

数学科教職課程における計算機科学基礎講義の実践

市吉伸行^{1,2}

¹(株)三菱総合研究所

²城西大学理学部数学科非常勤講師

1. はじめに

本稿では、2017年度の城西大学理学部数学科・紀尾井町キャンパスにおける教職課程での計算機科学基礎講義について報告する。科目名は「計算機数学」で、配当年次は2年次、週1コマ（金曜5時限（16:50～18:20））の通年講義で単位数4単位の科目である。

数学科での情報分野の教職課程科目の目的は、一義的には、高等学校情報科[1]の教員免許取得であり、情報科を教えることのできる基礎知識を学ぶためのものである。高校の情報科のうち、「社会と情報」は本学での情報リテラシー教育等でほぼカバーされているため、本講義は「情報の科学」を教える際の背景となる計算機そのものに関する基本的知識の習得を目的とした。具体的には、計算機がどのように構成されているかという工学的側面（計算機構成論）と計算・情報通信の数学的定式化と重要な性質の導出という理論的側面（計算理論、情報理論）を教えることとした。

聴講する学生は教員志望と限らず、また教員志望であっても実際に卒業後に教職に就くとは限らないが、本講義内容は民間企業等のIT分野でキャリアを積む際の基礎としても役立つ筈である。就職後に生かすこと以前に、数学の隣接分野として数学的思考の広がりを示し、純粋に面白さを伝えたいと願った。

2020年から施行される新指導要領では、小学校におけるプログラミング教育が必修化されることになっており、情報手段を活用した学習活動の充実も求められている。この指針がどのような実質を伴って行くか予想はできないが、今後、数年から十年程度で高校の情報科教育も高度化して行くことであろう（そうならなければならない）。その際、教える側の教員も、単に教科書範囲内の知識をそのまま教えるのではなく、計算機の原理や技術概要、理論的側面を幾分でも知った上で教えられることが望ましい。生徒に教える内容より少しでも広く、深く理解していることにより、エピソードを交えた授業で興味をかき立てたり、より進んだ学びへの動機づけをしたりすることができるであろう。

このような目的意識のもと、本講義の内容を検討し、実践した。それについて以下報告する。

2. 講義の目的および考え方

現在、本学紀尾井町キャンパスの数学科（以下、本キャンパス）では、フレッシュマンセミナーで集合や写像について学んだ上で、代数、幾何、解析等、大学数学の基礎的分野、応用数学（数値解析、数式処理、数理モデル、金融工学等）の講義が提供されている。情報系では、入門（科目名「計算機入門」）、情報リテラシー（「情報研究Ⅱ」）、プログラミング（「プログラミングⅠ」、「プログラミングⅡ」など）といった一般知識・スキル教育から、オートマトン、形式言語、計算複雑性（「情報数学」）、符号理論（「符号理論」）、暗号理論（「情報システム論Ⅰ」）など、より専門性の高い科目まで、相当程度広くカバーしている。

その中であって、「計算機数学」講義は、計算機そのものについての基本的・一般的な知識を学ぶ「計算機科学基礎講義」という位置付けで内容を検討した。「基本的・一般的な知識」というのは、講師の経験に即して、計算機関連分野に従事する者たち（教師、技術者、管理者等）に是非知っておいて欲しいレベルを目安にした。また、数学科学生向けということで、数学の学びの延長として、数学の隣接分野・応用分野である計算機科学の中身に一步踏み入れた内容とした。専門的になり過ぎず、かといって、トピック紹介に留まらず、原理の理解を目指す授業を目指した。

この学びを通じて、「ブラックボックス」（外から機能を利用する対象）だった計算機が「ホワイトボックス」（内的原理を理解する対象）になり、それが、例えば、数値計算等における処理の効率化・高速化を工夫する助けにもなれば、本キャンパスにおける研究と有機的に結びつくことになるだろう。また、本講義は計算機科学基礎として一応完結したものとして意図しているが、3年次以降に、より専門的な情報系講義を学ぶきっかけとなったり、予備知識として役立ったりすることも期待している。

また、社会に出て実際に情報技術系（ICT系）の分野に従事するようになった場合、計算機の構成や動作原理、計算・情報・通信に関する理論を少しでも知っていることは、より広く深い視野をもって様々な問題に取り組むための素地になる筈である。情報技術系企業では、現場で設計、開発、運用などに従事することで実践知識を身に付けたり、資格試験の受験によりスキルを高めることが推奨されたりするが、原理や理論の学びをする機会は乏しいのが実際である。対象である業務の置かれた実世界をどのようにモデル化して、どのように情報処理を組み立てて行くかといった、より根本

的な課題に取り組む際に、このような素養は生かされる。そこまで行かずとも、文系出身の SE も数少なくない業務環境において、数学科出身の強みを最大限生かすことになる（計算理論の初歩を知らない中堅 SE も数多く、キャリアを積むに従って差別化要因ともなる）。直接的には、情報処理技術者試験の「基本情報処理技術者」「応用情報処理技術者」の受験に役立つであろう。

3. 講義内容の検討

大学における情報科のカリキュラムとしては、(一般社団法人) 情報処理学会が中心となっており、とりまとめた「情報科標準カリキュラム」がある[2]。海外の標準カリキュラム（特に、米国計算機学会 (ACM) のカリキュラム）も参考にして作成した世界水準のものと言える。

情報分野を専攻するのではない一般コース向けの情報教育内容については、2001 年より情報処理学会の一般情報処理教育委員会にて継続して検討がなされ、一般情報教育の知識体系 (General Education Body of Knowledge, GEBOK) がまとめられ、標準カリキュラム策定やモデル教科書[5][6]の出版などが行われている[3]（最近の動向は、科研費「大学における一般情報教育モデルの構築に関する研究」の成果報告[4]に詳しい）。

本講義は情報分野専攻でない数学科での講義であり、GEBOK は講義の内容を検討する上での出発点として相応しい。GEBOK の学習エリアのうち、データ構造とアルゴリズム、データモデルなどは、座学よりもプログラミング教育・実習と組み合わせて学んだ方が、動機付けがあり、また実際に試すこともできるので、本講義のカバー範囲から外すことにした。一方、オートマトンと形式文法・言語、情報理論は、計算および情報通信の数学的な定式化や深い理論への入り口として、学んでもらうことにした。数学科の学生には理解可能であるし、また、数学の隣接分野を知る機会としても貴重なものだと考えた。

下表は本キャンパスにおける GEBOK エリアのカバー状況を示したものである。表において、IN は入門科目、LT は情報リテラシー科目、PG はプログラミング科目、CS は本科目（計算機数学）、AV は専門科目を指す。「○」はほぼカバー、「△」は部分的にカバーしていることを意味する。（同じエリアを複数教科で教えている場合もあるが、社会的視点と技術的視点、入門レベルと専門レベルなどの違いがある。）

表 1 GEBOK のエリアと本キャンパス情報系科目によるカバー状況

GEBOK エリア	概要	IN	LT	PG	CS	AV
科目ガイダンス	学内計算機環境、情報倫理規定、等	○				
情報とコミュニケーション	コミュニケーション、情報、知識などの概念、ユーザインターフェース、等		○			
情報のデジタル化	数値・文字の符号化、アナログ・デジタル変換、符号圧縮、情報理論(概念)、等				○	○
コンピューティングの要素と構成	計算機の全体構成、論理回路・動作原理、ハードウェア、ソフトウェア、OS、等		△		○	
アルゴリズムとプログラミング	アルゴリズム、アルゴリズムの良し悪し、扱いにくい問題(計算不能、現実的時間で解けない問題)、等			○	△	
データモデリングと操作	対象とモデル化、状態遷移モデル、グラフ、データ構造、等			○	△	
情報ネットワーク	ネットワークの概念、LAN、インターネットと仕組み、インターネットサービス、等		△		○	
情報システム	様々な産業分野の情報システム、企業内IS、社会基盤としてのIS、等		○			
情報倫理とセキュリティ	各種検索サービス、認証、不正アクセス、知的所有権侵害、情報セキュリティ、等		○			○
コンピュータリテラシー補講(先修条件)	計算機の基本操作、表計算、電子メール、等	○				

この表から、本キャンパスにて全体として GEBOK エリアがカバーされており、本科目も一定の貢献をしていることが見て取れよう。

4. 講義の構成、教科書・参考書、授業方法

本講義のシラバスを示す。前期は計算機構成論の基礎、後期は情報科学(計算機科学)の基礎と大きく二つに内容を分けた。

表 2 シラバス内容

前期<計算機構成論の基礎>
<ol style="list-style-type: none"> 1. 導入 (コンピュータの歴史、基本構成、等) 2. 情報の表現 (1) 3. 情報の表現 (2) 4. 論理回路と CPU (1) 5. 論理回路と CPU (2) 6. 記憶装置と周辺機器 (1) 7. 記憶装置と周辺機器 (2) 8. 中間まとめ (最近のトピック、理解度テスト、Q&A) 9. プログラムとアルゴリズム (1) 10. プログラムとアルゴリズム (2) 11. OS とアプリケーション (1) 12. OS とアプリケーション (2) 13. ネットワークとセキュリティ (1) 14. ネットワークとセキュリティ (2) 15. まとめ (最近のトピック、理解度テスト、Q&A)
後期<情報科学の基礎>
<ol style="list-style-type: none"> 1. 導入、基本的な記法 (集合、論理、関係と写像、文字列と言語) (1) 2. 基本的な記法 (集合、論理、関係と写像、文字列と言語) (2) 3. 帰納 (再帰) 4. グラフ 5. オートマトンと形式言語 (1) 6. オートマトンと形式言語 (2) 7. 集合と論理 8. 中間まとめ (最近のトピック、理解度テスト、Q&A) 9. 計算のモデル 10. 計算の可能性 11. データの取扱い、情報量 12. 符号 13. データの圧縮 14. 暗号 15. まとめ (最近のトピック、理解度テスト、Q&A)

授業時間の関係で不十分にしか取り上げられなかったテーマもあるが、ほぼ当初策定シラバスの範囲をカバーした。GEBOKで紹介程度の扱いとなっている計算論と情報理論については、複数回にわたりやや詳しく授業を行った。

計算論では、機械による計算の厳密な定義をすることの意義を強調し、数学的な定義および成り立つ（定理として証明可能な）基本的な性質を紹介した。具体的には、有限オートマトン、プッシュダウンオートマトン、チューリングマシン（動作例、万能チューリングマシン、停止問題の計算不能性）、形式文法・言語とオートマトンの認識する言語の関係などを取り上げた。情報理論では、情報の「量」を定義した場合にそれが持つべき性質から関数形を導くこと、情報源や通信路の問題設定と数学的なモデル化について述べ、符号化による情報の圧縮の例と限界（情報源符号化定理）、雑音のある通信路での信頼性のある通信の実現（通信路符号化定理）などを紹介した。重要な定理はできるだけ証明の概略を示したが、事実のみの紹介に留めたものもある。

教科書は、前期は「基本を学ぶコンピュータ概論」[9]にほぼ沿った形で進め、後期は取り上げる範囲や取り上げ方が今回の趣旨にあった教科書がなかったため、配付教材を作成して、それをを用いて説明した。（シラバスでは「情報科学の基礎」[10]を教科書として挙げたが、記述の抽象度が高く、動機付けや具体例が少ないことが授業準備段階で判明したため、独自の配布教材を作成し、それをを用いて教えることにした。）

計算機科学の基礎を解説する大学向けテキストとしては、GEBOKを教科書として実現した「情報とコンピュータ」（情報処理学会編集）[6]があるが、半年15回授業向けに作られているため、やや知識の羅列になっている面があり、1年かけてもう少し丁寧に「ココロ」（動機や理由）を伝えようとする今回の講義向けには適当でないと判断した。その他、東京大学教養学部テキストの「情報」[7]は優れた教科書であり、「何故そのようにするか」という理由が丁寧に解説されているが、やはり半年の期間に沢山のテーマを取り上げているため、一つ一つが事実や概念の紹介に留まっている。同様に、放送大学大学院用の「基礎情報科学」[8]も平易な言葉で深い内容を伝えようとする優れた教科書だが、学部レベルで、一通り計算機科学の概念や基礎知識を学んだ学生が、より深く学んで行く際の導入書としての位置づけと思われ、教科書として採用しなかった。個別テーマであるオートマトンと形式文法/言語や情報理論については、優れた入門的書籍が数多く（オートマトンと形式文法/言語は[11][12]、情報理論は[13][14]など）、記法、概念の導入や展開方法を参考にした。（ただし、各書籍を丁寧に教えると、それだけで15回授業が埋まってしまうので、動機、定義と例、重要・基本的な定理に絞って教えた。）

5. 理解度テストおよびレポート課題

理解度の評価・確認、知識定着のために理解度テストを4回実施した。前期、後期とも中間（8回目）と最終回（15回目）に実施し、基礎的な知識を問う問題と計算問題を中心とした小テスト（20項目前後で50点満点）とした。全体的に期待した理解度に達していないとテスト採点結果から判断される場合は再試験を実施した。

また、自らテーマを選び、調べ、まとめる経験をさせるため、レポート提出を課した。前期は、「コンピュータの先駆者」と「先駆的コンピュータ」のいずれかを選んでレポート提出させ、数人に発表をさせた。原則、表3の候補の中から選ぶように指示したが、例示リストにない人物やコンピュータを取り上げることも可とした。（実際、国産スパコンの「京」を取り上げ、PowerPointで発表する学生がいた。）

後期は、有限オートマトンによる実世界の現象のモデル化、講義全体の振り返り（何を学んだか、どう生かすか、等）の2つのレポートを課した（表4）。

これらレポート課題への取り組みにより、学生が受身的になりがちな講義を少しでも補うことを狙った。

表3 前期レポート課題（課題1、課題2からいずれか一つを選択）

前期課題1「コンピュータの先駆者」（提出期限：第10回授業）	
パスカル（現存する最古の計算機の発明者）	ツーゼ（プログラム可能計算機を開発）
ライプニッツ（機械式計算機の機構を考案）	アタナソフ（世界初真空管計算機を開発）
バベッジ（今日の計算機と同等の機構を持つ「解析機関」を考案）	エッカートとモークリー（汎用真空管計算機ENIACを開発）
ブール（論理回路の基礎となる代数を考案）	フォン・ノイマン（プログラム内蔵型計算機の論文を発表）
チューリング（理論研究のため仮想的計算機を考案）	
前期課題2「先駆的なコンピュータ」（提出期限：第14回授業）	
ENIAC（最初の本格的な電子計算機）	
IBM システム/360（以後数十年にわたる商用計算機の礎）	
FACOM100（日本国産の独創的な計算機）	
Cray-1（スーパーコンピュータの先駆け）	
PDP-11（ミニコンピュータの先駆け）	
4004（世界初のマイクロプロセッサ）	
Alto（現在に至るユーザインターフェースを先駆的に実現）	
IBM PC（現在に至るパソコンの元祖）	

表 4 後期レポート課題（課題 1、課題 2 の両方を提出）

後期課題 1「有限オートマトンによるモデル化」(提出期限：第 9 回授業)
<ol style="list-style-type: none"> 1. 有限オートマトンの 5 つ組 $\langle Q, \Sigma, \delta, q_0, F \rangle$ (Σ、δ、q_0、F のそれぞれを具体的に示す。) 2. 状態遷移図 3. 動作例 (2 つ以上) 4. 感想 (対象物の何が表現できて何が表現できなかったか、その他)
後期課題 2「計算機数学を振り返って」(提出期限：第 14 回授業)
<ol style="list-style-type: none"> 1. 4 月から授業を聞いてきた「計算機数学」で何を学んだか。 2. 今後、どのように生かして行きたいか。 3. 感想 (何が面白かったか、分かりにくかったか、その他) 4. 改善提案 (テーマ、内容、教え方等について、「こうしたらより良くなる」という提案を記してください。)

前期の発表は、レポートをそのまま読み上げる学生が多く、プレゼンの意義や練習を重ねる必要が感じられた。(第 1 回は指定した制限時間約 5 分間を超過する発表者が多かったので、第 2 回はチャイムを鳴らして、最後のまとめを促すようにした。)

後期第 1 回の有限オートマトンによるモデル化は、当初、趣旨を理解できず、取り掛かれない学生もいたため、具体例を示し、身近なものを取り上げるよう促した。その結果、スタンダードな自動販売機その他、卓上ランプ、起床して大学に登校するプロセス、星の一生、さらには輪廻を取り上げる学生もあり、興味深かった。受講者にとっても面白い経験だった様子である。

後期第 2 回は学んだことの振り返り (それによって少しでも定着するように) を目的とし、率直な感想や次年度以降の授業改善に向けた改善提案を募った。好意的な感想も少なくなかった一方、具体的な改善指摘も多くもらった。板書の改善 (字が小さい、読みづらい)、例題演習を増やすこと、金曜 5 限以外の時間帯での授業の希望 (金曜夕方になると学生が疲労しているため)、教室の手前側に学生を集めること (後ろだと白板が読みづらく、うたたねもし易い)、学生への発問と指名を増やす、後期の授業内容がやや難しかった、等々である。

6. 補足：計算機科学分野について

計算機科学という分野は、数学の隣接分野とも言える学問領域であり、応用数学的な側面もある。計算理論は、機械による計算を数学的に明確に定義して、通常の数学理論と同様な論証で理論展開する分野である。情報理論は、人が漠然と理解している情報や情報の量というものを定義し、情報（特に情報源や通信路）を確率論的にモデル化して、その上で、やはり数学的に理論展開する分野である。物事をモデル化して数学の世界に乗せ、理論展開するという数理科学のアプローチの具体例の学びにもなるものであり、応用数学を志向する者にとって応用分野の視野を広げる意味があるはずである。

7. まとめ

本学紀尾井町キャンパスにて 2017 年度から開始した計算機科学基礎分野の講義について、その位置づけ、内容、シラバス、教科書等を報告した。初年度ということもあり、教材作成に準備時間の大部分が割かれ、詳しい内容吟味や教授法の工夫（講義以外の教授方法の試み等）が不十分だった。他教科とのバランス、GEBOOK のエリアで十分教えられなかった部分のカバー、教授法の改善などが今後の課題と考える。色々な教科書の特徴や優れた面について、より広く詳しく調べ、学ぶことも必要と考える。後期の最後に募った改善提案は、勿論、大いに参考にしたい。それらをもとに改善し、より良い講義を 2018 年度以降に提供して行くことを目指したい。

参考文献

- [1] 久野 靖、辰巳丈夫監修「情報科教育法（改訂 3 版）」オーム社（2016 年）
- [2] 筧 捷彦「情報専門学科カリキュラム標準 J07 について」情報処理 Vol. 49, No. 7（2008）
- [3] 大学等における一般情報処理教育の在り方に関する調査研究(文部科学省委嘱調査研究), 平成 13 年度報告書（2002）
- [4] 「これからの大学の情報教育」日経 BP マーケティング（科研費（課題番号：25350210）「大学における一般情報教育モデルの構築に関する研究」成果報告）（2016 年）
- [5] 情報処理学会編集「情報とネットワーク社会」オーム社（2011 年）
- [6] 情報処理学会編集「情報とコンピュータ」オーム社（2015 年）
- [7] 川合 慧編「情報」東京大学出版会（2014 年）

- [8] 川合 慧、萩谷昌己「基礎情報科学」放送大学教育振興会（2009年）
- [9] 安井浩之、他「基本を学ぶコンピュータ概論」オーム社（2016年）
- [10] 山崎秀紀「情報科学の基礎 —記法・概念・計算とアルゴリズム—」サイエンス社（2008年）
- [11] 米田正明監修「オートマトン・言語理論の基礎」近代科学社（2016年）
- [12] 岡留 剛「例解図説 オートマトンと形式言語入門」森北出版（2015年）
- [13] 甘利俊一「情報理論」ちくま学芸文庫（2016年）
- [14] 植松友彦「情報理論の考え方」講談社（2014年）