

朝倉電気・電子工学講座

17

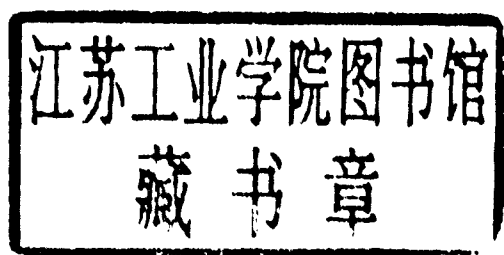
新版 電子計算機工学

中川裕志 著

朝倉書店

新版 電子計算機工学

中川裕志 著



朝倉電気・電子工学講座

17

朝倉書店

著者略歴

なか がわ ひろ し
中 川 裕 志

1953 年 千葉県に生まれる

1975 年 東京大学工学部電気工学科卒業

現 在 横浜国立大学工学部電子情報工学科教授
工学博士

朝倉電気・電子工学講座 17

新版 電子計算機工学

定価はカバーに表示。

1984 年 10 月 15 日 初版第 1 刷

1995 年 3 月 1 日 第 10 刷

1996 年 4 月 10 日 新版第 1 刷

著 者 中 川 裕 志

発行者 朝 倉 邦 造

発行所 株式会社 朝 倉 書 店

東京都新宿区新小川町 6-29

郵便番号 1 6 2

電 話 03 (3260) 0141

FAX 03 (3260) 0180

<検印省略>

© 1996 <無断複写・転載を禁ず>

ISBN 4-254-22695-0 C 3354

新日本印刷・渡辺製本

Printed in Japan

 <日本複写権センター委託出版物・特別扱い>

本書の無断複写は、著作権法上での例外を除き、禁じられています。
本書は、日本複写権センターへの特別委託出版物です。本書を複写
される場合は、そのつど日本複写権センター（電話 03-3401-2382）
を通して当社の許諾を得てください。

序

今は、Ubiquitous Computer (いたるところ計算機) の時代です。オフィスや工場のいかにも計算機らしい計算機はもちろんのこと、ちょっとした家庭電化製品にもマイクロプロセッサというれっきとした計算機が使われています。でも、こんなに計算機に囲まれているのに、計算機のメカニズムとりわけハードウェアについてはほとんどわからないという人が多いにちがいません。そして、どんなメカニズムで動いているかわからないものを使うのは気持ち悪いという人もけっこういるのではないのでしょうか。ましてや、将来、計算機に関連する勉強や仕事する人は、やはり一度は計算機のメカニズムを勉強しておくほうが望ましいといえます。この本は、そんな人のための計算機ハードウェアの入門書です。

12 年ほど前、大学に勤めたての筆者は、東京大学工学部の斉藤忠夫先生から勧められて、おぼつかないながらも「電子計算機工学」という本を仕上げることができました。当時、いろいろな御助言をいただいた斉藤先生に感謝します。その後、本書は予想外に多くの方に読んでいただき、筆者としてもうれしい限りです。しかし、計算機分野は進歩が早く、初版で大型計算機で使用される高級な技術として紹介した技術は、いまや小さなワークステーションでもあたりまえに使われており、また種々の要素の装置の性能向上は著しく、また新しいインタフェースも実用に供されるようになりました。一方で、プロセッサ自体のメカニズムの根本は極端な変化もなく、ある意味では成熟した技術といえます (もちろん、RISC の台頭などそれなりに大きな変化はあるのですが)。このような事情を考慮し、今回の改訂では、旧版から進歩の著しい部分に限って内容を新しくしました。この版も少しでも多くの方のお役に立てれば、と願っております。

1996 年 2 月

著 者

大矢雅則・今井秀樹・小嶋 泉 編
中村八束・廣田正義

数 理 情 報 科 学 事 典

12089-3 A 5 判 1200頁 定価29870円

「情報」とは何か?どこまでわかっているのか?その歴史・現在と未来を、基礎から応用まで解説する総合的な大項目事典。情報科学とその関連分野全体を、理学・工学から社会科学まで、学際的なつながりと数理的な基礎を重視して網羅する。

名 大岡田 稔他 4 氏著
助教授

Open Windows による

ワークステーション入門

12098-2 B 5 判 288頁 定価2678円

理科系・文科系を問わず、初心者が安心して「オープンウィンドウズ環境の Unix」に関する必要な知識を独学で修得でき、さらに豊富なアプリケーションソフトウェアの使い方まで、わかりやすく一冊にまとめられたテキスト。

九州工業大学情報科学センター編

XウィンドウによるUNIX入門

—教育・研究のためのEWS操作ガイド—

12088-5 B 5 判 256頁 定価2369円

教育・研究現場で急速に普及しているEWS環境を十二分に使いこなすための初心者向けテキスト [略目次]WSの使い方/Xウィンドウシステム/UNIX/エディタ/日本語入力/電子メール・ニュース/シェルプログラミング/TEX入門

京 大萩原 宏著
名誉教授

電子計算機通論 1 論理回路

22121-5 A 5 判 224頁 定価3605円

電子計算機や各種の制御装置などに使われているデジタル回路の論理設計の基礎となる理論回路の理論について解説した。[内容] ブール代数, 論理関数の簡単化, 多重論理関数の簡単化, その他の論理演算, 順序回路, 非同期回路。

京 大萩原 宏著
名誉教授

電子計算機通論 2 演算・制御装置

22122-3 A 5 判 220頁 定価3296円

電子計算機の中枢部をなす演算・制御装置について解説。算術演算の方式, 演算のための基本回路, 演算装置の構成, 制御装置の概要にわたり説明。[内容] 情報の表現, 数の表現, 基数の変換, 算術演算Ⅰ・Ⅱ, 演算回路, 演算装置, 制御装置。

グループ21編

Cによるプログラミング

12094-X A 5 判 232頁 定価3605円

実用的汎用プログラミング言語として普及したC言語は、あらゆる種類のアルゴリズムを表現しプログラミングするのに最も適した言語である。本書はC言語の勉強を始め、種々の問題のプログラミングを試みる人のために考え方、作り方を解説

筑波大 中澤喜三郎著
教 授

計算機アーキテクチャと構成方式

12100-8 A 5 判 584頁 定価12360円

日本のコンピュータ黎明期より、第一線で研究・開発・設計に携わってきた著者が、その多大な実務経験をもとに、アーキテクチャの実際をまとめたもの。一から経験しなければわからないノウハウを散りばめ、様々な問題点を明らかにする。

東京理大 富澤儀一著
助 教 授
情報処理ライブラリー3

コンピュータネットワークの基礎

12593-3 B 5 判 148頁 定価2781円

章冒頭に“学習の内容”、章末尾に“まとめ”と問題を配し、平易に丁寧に基礎を説く。[内容] コンピュータネットワークの誕生/データ通信システム/データ伝送/通信回線/通信制御/ネットワーク/ネットワークサービスの利用

定価(消費税込)は1996年4月現在

目 次

1. 電子計算機とは	1
1.1 計算機の歴史	1
1.2 計算機の基本構成と動作	3
1.3 本書の構成	7
2. 情報の表現と符号	9
2.1 2進数表現	9
2.2 算術演算のアルゴリズム	12
2.2.1 加 減 算	12
2.2.2 乗 算	14
2.2.3 除 算	18
2.3 数値の表現	20
2.4 符号表現	23
演 習 問 題	27
3. 記憶の論理的構造	28
3.1 記憶の単位	28
3.2 データ形式	29
3.3 アドレス方式	31
3.3.1 アドレス指定のレベル	32
3.3.2 アドレス修飾	33
3.3.3 アドレス方式の組合せ	35
3.4 スタック	36
演 習 問 題	39

4. 論 理 回 路	40
4.1 プール代数	40
4.2 組合せ論理回路	44
4.3 加 算 回 路	47
4.3.1 2進加算器	47
4.3.2 BCD加算器	49
4.4 順 序 回 路	50
4.4.1 順序回路の概念	50
4.4.2 フリップフロップ	52
4.4.3 補数器・比較器	54
4.4.4 カウンタ	55
演 習 問 題	57
 5. 演 算 装 置	58
5.1 レジスタ	58
5.2 直列型 ALU	60
5.3 並列型 ALU	61
5.4 乗除算回路	65
5.5 演算のパイプライン処理	69
演 習 問 題	71
 6. 中 央 処 理 装 置	72
6.1 CPUの構造と動作	72
6.1.1 構 造	72
6.1.2 動 作	75
6.2 命令の種類と動作	77
6.3 モデル計算機的设计	85
6.3.1 仕様と構成	85
6.3.2 論 理 設 計	88

演習問題	94
7. 計算機アーキテクチャの展開	95
7.1 マイクロプログラム制御	95
7.2 命令パイプライン	98
7.3 計算機の手速を決める要因	101
7.4 RISC アーキテクチャ	102
演習問題	105
8. 主記憶装置	107
8.1 主記憶装置の構成	107
8.2 記憶素子	110
8.2.1 半導体記憶	110
8.2.2 RAM と ROM	112
8.3 高速化と信頼性	113
8.3.1 インタリーブ	113
8.3.2 誤り訂正回路	114
演習問題	115
9. 外部記憶装置	116
9.1 外部記憶装置の一般論	116
9.2 磁気記憶装置	117
9.2.1 磁気ディスク	118
9.2.2 磁気テープ	119
9.2.3 超大容量記憶装置	120
9.2.4 フロッピーディスク	121
9.2.5 CD-ROM	122
9.2.6 光磁気ディスク	122
9.3 各種外部記憶装置の比較評価	122

演習問題	123
10. 入出力	124
10.1 入出力インタフェース	124
10.2 並列入出力	129
10.3 バス型インタフェース	132
10.4 直列入出力	134
10.5 LAN インタフェース	138
10.6 入出力装置	140
演習問題	142
11. チャンネル	143
11.1 チャンネル制御方式	143
11.2 チャンネルの構造と動作	145
11.3 種々のチャンネル	149
演習問題	152
12. 割込みとシステム制御	153
12.1 割込み処理	153
12.2 オペレーティングシステムと割込み	158
演習問題	162
13. 記憶の階層構成	163
13.1 記憶の断層化	163
13.2 キャッシュ記憶	167
13.2.1 動作原理	167
13.2.2 マッピング方式とリプレースメント	168
13.2.3 ブロック転送とストア方式	172
13.2.4 ま と め	173

13.3 仮想記憶	173
13.3.1 必要性と原理	173
13.3.2 記憶管理方式	176
13.3.3 効率化	178
13.3.4 ま と め	183
演習問題	184
参考文献	185
演習問題解答	187
索引	197

1. 電子計算機とは

電子計算機のハードウェアは、複雑な機能を有する電子回路の大規模な集合体である。したがって、電子計算機について学ぶときは、部分部分の複雑さに目を奪われがちである。しかし、ある部分の機能や構成を真に理解するためには、その部分が全体に対していかなる位置付けになるかを把握していなければならない。本章では、電子計算機のおよその構成、動作について学び、以下の各章において展開される各論の位置付けをするために電子計算機の全体像を把握する。

1.1 計算機の歴史

電子計算機の歴史は、古くは17世紀のPascalやLeibnizにまで遡ることもできるが、この時代は歯車などの機械的操作によるものであった。19世紀にイギリス人Babbageは機械的仕掛けながら記憶や制御の概念を用いた計算機械を作っている。しかし電子工学技術を利用した電子計算機としては、1945年にペンシルバニア大学でJ.P. Eckertらによって作られた真空管による計算機ENIACが初めてのものであろう。ただしENIACにおいては、計算方法の指示すなわちプログラムは配線によって与えていたため、その変更は容易ではなかった。1946年にJ. von Neumannによって出された計算機設計に関する提案は、この点を改良したものである。すなわち、その内容は、プログラム記憶方式(stored program)、2進法演算などを採用することである。プログラム記憶方式とは、おおまかにいえば、命令とデータを同じ表現形式で同じ記憶装置内に蓄えておくことである。そして記憶装置から読み出した情報は命令であれば制御装置に、データであれば演算装置に送り込んで計算を実行するというものである。この方式の採用により、長大なプログラムの作成が可能になり、今日の計算機の原理的基礎が確立した。Neumannの提案はペンシルバニア大学でのEDVACの開発に具体化され、以後この方式による商用計算機も続々と作成されるようになった。

1954 年以降、計算機は実用化の時代に入る。時代区分として、1954～1958 年を第 1 世代、1959～1964 年を第 2 世代、1965 年以降の 15 年間くらいを第 3 世代と呼んでいる。第 1 世代の計算機は演算装置は真空管、記憶装置は水銀遅延回路、磁心記憶などを用いて作られていた。加減算の速度は $50\sim 500\ \mu\text{s}$ (マイクロ秒) 程度、記憶容量は 1000 語¹⁾ オーダーであった。第 2 世代の計算機は演算装置はトランジスタを用いて作られ、記憶装置は磁心記憶が主流になった。加減算の速度は $10\ \mu\text{s}$ 以下になり、記憶容量は数 10 K²⁾ 語になった。第 3 世代の計算機は演算装置に集積回路 (IC)、大規模集積回路 (LSI) を用いている。また記憶装置にも LSI が用いられるようになった。加減算の速度は $1\ \mu\text{s}$ 以下、記憶容量は数 100 K～数 M²⁾ 語にまで拡大した。さらに、80 年代に入り VLSI や ULSI が使われるようになると第 4 世代となり、演算速度は 10 ns (ナノ秒) 以下、記憶容量は数 10 M 語というように飛躍的に性能が向上した。しかし、より重要なのは、科学技術計算を超高速で行う大型計算機と小型で安価なワークステーションやパーソナルコンピュータに分化したことである。そして、計算機の基本設計思想いわゆるアーキテクチャも変化してきた。これについては第 7 章で説明するが、自分の使っている計算機のアーキテクチャを知することは、その能力を効率よく利用するために重要である。実際のワークステーションなどのアーキテクチャはとても凝ったものであり、全容の把握は困難であるが、そこで使われている基本的技術は、本書の説明で相当カバーされている。

ここで、計算機の性能を測る単位について説明しておこう。まず、最も基本的なのは MIPS (million instructions per second) であり、1 秒間に実行する機械語命令数を 100 万単位で表したものである。一方、数値計算の能力を測るには 1 秒間に実行する浮動小数点演算³⁾ の回数を 100 万単位で表した MFLOPS (million floating-point operations per second) という単位が使われる。しかし、これらは実行時間の異なる種々の命令が、実際のプログラムでどのような

¹⁾ 計算機の記憶における意味のある単位を語 (ワード: word) と呼ぶ。意味のある単位とは、例えば 1 個の機械語命令などである。

²⁾ 計算機の世界では、 $2^{10}=1024\approx 10^3$ を 1 K (ケー)、 $2^{20}\approx 10^6$ を 1 M (メガ)、 $2^{30}\approx 10^9$ を 1 G (ギガ) と呼ぶ。

³⁾ 浮動小数点型のデータおよび演算については第 2 章で述べる。

頻度で使用されるかを正確には反映していない。そこで、アメリカの計算機関連の会社を中心になった SPEC (Systems Performance Evaluation Cooperative) という団体が作成したベンチマークを利用することが多い。このベンチマークは、C 言語でかかれたコンパイラなどの数個のプログラムと Fortran で書かれた数個の数値計算のプログラムからなる。C 言語のプログラムはほとんど整数演算だけなので記憶へのアクセスや整数演算の速度を評価できる。各プログラムの結果の幾何平均を SPEC int あるいは新規のベンチマークの場合は SPEC int 92 と呼ぶ。また、Fortran のプログラムは浮動小数点演算を多様する数値演算プログラムの速度を評価でき、各プログラムの結果の幾何平均を SPEC fp あるいは新規のベンチマークなら SPEC fp 92 と呼ぶ。これらは、実際に使われているプログラムの速度をかなり正確に反映しているといわれ、計算機の性能評価にしばしば使われている¹¹。

1.2 計算機の基本構成と動作

現在の計算機はほとんどが von Neumann の提案を原理的基礎としており、俗に von Neumann 型計算機¹²と呼ばれている。計算機を理解する第一歩として、von Neumann 型計算機的基本的な構成と動作について以下で説明する。

a. 基本的構成 計算機は図 1.1 に示すように、中央処理装置 (central processing unit: 以後 CPU と呼ぶ)、記憶装置 (memory: メモリ)、入出力装置 (input/output device) から構成される。

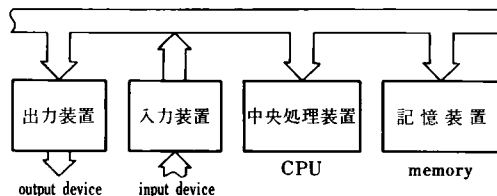


図 1.1 計算機の基本構成

¹¹ 1990 年代中頃の比較的安価なワークステーションでは SPEC int 92 が 100 程度、SPEC fp 92 も同様、という状況であった。

¹² 最近では von Neumann 型計算機の限界も論じられており、非 von Neumann 型計算機として種々の提案や研究がさかんである。

CPU は図 1.2 に示すように、制御装置、演算装置およびレジスタから構成される。制御装置は、CPU 内部および計算機全体において、各時点で実行すべき動作を指令し、データの流れを制御する。演算装置は ALU (arithmetic and logic unit の略) と呼ばれ、加減算などの算術演算に代表される種々の演算を実行する。通常、図 1.2 に描かれた ∇ の形で表現される。レジスタ (register) は CPU 内部におけるメモリである。ALU への入力データや演算結果のデータを CPU 内で一時的に保持するためなどに使われる。普通、数語から数 10 語分用意されている。

図 1.1 の記憶装置には、プログラムと、プログラムの実行において必要となるデータや、実行結果のデータなどが記憶されている。

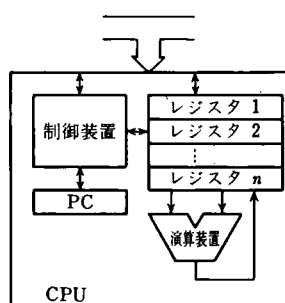


図 1.2 CPU の構造

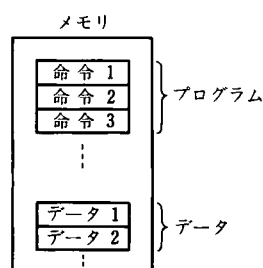


図 1.3 メモリ中のプログラムとデータ

入力装置は外部からプログラムやデータ^{*}を計算機内部に読み込むための装置である。代表的なものとしては、キーボードなどがある。出力装置は計算機内部のデータ、例えばプログラムの実行結果などを表示、出力する装置である。代表的なものとしては、ブラウン管ディスプレイ、各種プリンタなどがある。

b. 基本動作 メモリには、図 1.3 に示すようにプログラムを構成する命令の列と、プログラムで利用されるデータが記憶されている。図 1.3 に基づいて、CPU が記憶されているプログラムを実行する動作を説明する。

① CPU はメモリから命令 1 を制御装置に読み込み、いかなる種類の命令か

^{*} プログラムも計算機からみればデータの一種である。読み込んだデータがプログラムかどうかは、計算機内部の情報処理の手順によって決まる。

を解析する。

- ② ①の解析結果にしたがって、演算を実行する。例えば、命令1が“メモリに記憶されているデータ1とデータ2を加算して、データ1の場所に書き込め”という命令であれば、CPUは次のように動作する。
 - ②-i データ1をメモリからCPU内の適当なレジスタ i に読み込む。
 - ②-ii データ2をメモリからCPU内の別の適当なレジスタ j に読み込む。
 - ②-iii レジスタ i とレジスタ j の内容をALUに与えて加算を実行し、その結果を適当なレジスタ k に格納する。
 - ②-iv 演算結果であるレジスタ k の内容をメモリのデータ1の記憶されていた場所に書き込む。

以下、CPUは命令2,3,...に対して①,②の動作をくり返すことによって、プログラムを実行していく。①の動作を**命令取り出し段階**(instruction fetch cycle)、②の動作を**命令実行段階**(instruction execution cycle)と呼ぶ。

プログラムにおいて計算のために必要とするデータを外部から読み込む場合や、計算した結果を外部に表示する場合には、入出力装置とCPUの間でのデータの受け渡しが必要になる。この受け渡し、すなわち入出力動作を行う命令を入出力命令と呼ぶ。入出力命令においては、命令実行段階で入力装置からデータをCPUに読み込む(入力命令)、あるいはCPUからデータを出力装置に書き出す(出力命令)動作を行う。

c. プログラムカウンタ CPUは命令読み出し段階において、命令をメモリ上のどの位置から読み出すべきかをどのようにして知るのだろうか。このための情報はCPU内のプログラムカウンタ(program counter: PC)と呼ばれる特別なレジスタに記憶されている。したがって、命令実行段階の終了時点すなわち次の命令の命令読み出し段階の開始までには、新しいPCの値が確定していなければならない。PCの動作の詳細については後の章で述べる。

d. プログラムと言語 これまでに説明してきた命令は、計算機の動作を直接に指示するものであった。このような命令を機械語命令(machine instruction)と呼ぶ。機械語命令全体はひとつのプログラム言語であり、機械語(machine language)と呼ぶ。機械語命令は0と1の系列であり、人間にとって馴

みのよいものではない。そこで機械語と1対1に対応し¹⁾、かつ人間に馴染みのよいシンボリックな言語としてアセンブリ言語 (assembly language) が考えられた。アセンブリ言語では、各機械語命令に覚えやすい名前がつけられている。この命令の名前をニーモニック (mnemonic¹²⁾) と呼ぶ。アセンブリ言語で書かれたプログラムは、図 1.4 に示されるようにアセンブラ処理系 (assembler) と呼ばれるプログラムによって機械語のプログラムに変換される。

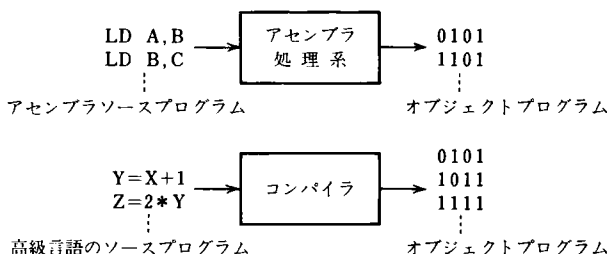


図 1.4 ソースプログラムからオブジェクトプログラムへの変換

計算機の進歩とともに複雑かつ長大なプログラムが作られるようになると、アセンブリ言語ですべてのプログラムを書くことは、人間の能力の限界を越えるようになってきた。このため、計算機に解かせるべき問題をより抽象的なレベルで記述できるプログラム言語すなわち高級言語が用いられるようになった。高級言語では、計算すべき数式を、 $X=Y+\sin(Z)$ などのように普通の数学的な記述に近い形で記述できる。高級言語で書かれたプログラムは、図 1.4 に示されるように、コンパイラ (compiler) と呼ばれるプログラムによって機械語のプログラムに変換される。高級言語としては、C 言語、FORTRAN、Perl、PASCAL、BASIC などが普及している。アセンブリ言語や高級言語で書かれたプログラムをソースプログラム (source program) と呼び、変換されて機械語になったプログラムをオブジェクトプログラム (object program) と呼ぶ。

以上、述べてきたように、計算機には電子回路としてのイメージすなわちハ

¹⁾ 実際は、1対1に対応する部分に、擬似命令と呼ばれるアセンブリ言語固有の部分が追加されている。

¹²⁾ 記憶を助ける、という意味の形容詞。通常、記号命令と訳している。

ードウェアと、計算機に何をやらせるかを記述するプログラムすなわちソフトウェアの両面がある。本書では、主としてハードウェアについて述べる。しかし、ハードウェア自体はソフトウェア面からの要請によって変化し、また新しいハードウェア技術は、ソフトウェアの作り方に影響を及ぼす。したがって、計算機を学ぼうとする者は、ハードウェア、ソフトウェアの両面からの学習と理解が必要である。

1.3 本書の構成

本書の以下の部分では、前節でその概略を述べた計算機の構成、動作などについて詳しく述べるが、おおまかにいって4個の部分に分かれている。

第1の部分は、第2,3章であり、計算機理解の土台となる計算機における情報の扱い方の基礎について述べる。第2章では、数値情報の表現方法と、四則演算のアルゴリズム、文字情報の表現法について説明する。第3章では、記憶の論理的構造、特定のデータベースへのアクセスの仕方（アドレス方式）について説明する。

第2の部分は、第4,5,6,7章であり、中央処理装置（CPU）のハードウェア構成について述べる。第4章では、ハードウェアの基礎となる論理回路について学ぶ。この章は、以後の第5,6,7章を学ぶための基礎となる部分である。第5章では、加減乗除などの演算を実行する演算装置の構成、動作について説明する。また、演算高速化技術として、パイプライン制御についても学ぶ。第6章では、演算装置を含む中央処理装置（CPU）の構成と、機械語命令について説明し、次にCPUの動作を制御する制御装置について、簡単な設計例によって学ぶ。第7章ではマイクロプログラム制御、命令パイプライン、RISCなどの進んだテーマを取り上げる。

第3の部分は、第8,9章からなり、記憶装置の実際について学ぶ。第8章では、主記憶装置について、その構成、素子などについて説明する。第9章では、外部記憶装置について、性能評価、各種の装置などについて説明する。

第4の部分は、第10,11,12,13章からなり、入出力を含めて、現代の計算機を効果的に利用する技術について学ぶ。第10章では、基本的な入出力方法、装