

並列計算機

R.W.Hockney・C.R.Jesshope 共著

奥川峻史・黒住祥祐 共訳

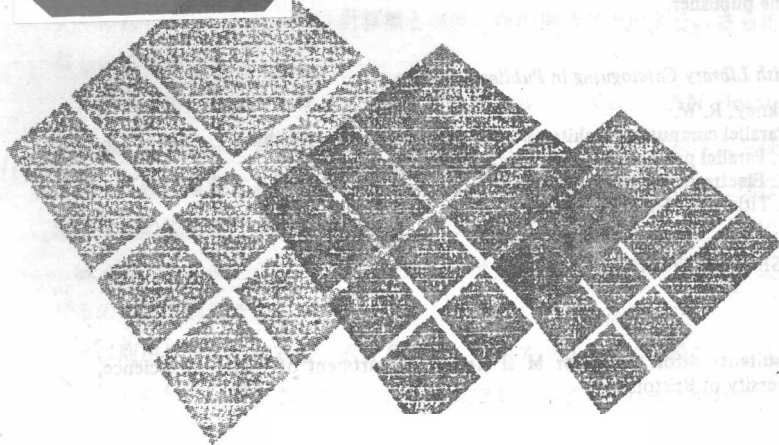
並列計算機



R.W.Hockney・C.R.Jesshope 共著

奥川峻史・黒住祥祐 共訳

TP3
A759



TP3

共立出版株式会社

A759

© 1981 R W Hockney and C R Jesshope

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publisher.

British Library Cataloguing in Publication Data

Hockney, R. W.

Parallel computers: architecture, programming and algorithms.

1. Parallel processing (Electronic computers)

2. Electronic digital computers

I. Title II. Jesshope, C. R.

001.64 QA76.6

ISBN 0-85274-422-6

Consultant editor: Professor M H Rogers, Department of Computer Science,
University of Bristol

Published by Adam Hilger Ltd
Techno House, Redcliffe Way, Bristol BS1 6NX

The Adam Hilger book-publishing imprint is owned by
The Institute of Physics

Printed in Great Britain by J W Arrowsmith Ltd, Bristol

序

本書は、計算の将来のパターンを決定するのにかなり重要な意味をもつと思われる、計算機科学の特定の分野を取り扱うモノグラフ（特定の主題に関する専攻論文）の新シリーズの第1冊目である。過去20年ばかりの間に起こった非常に急激な変化は現在もまったく衰える気配はなく、今後10年間に起こるであろう変化は、特に半導体技術の進歩によって可能となった計算機のアーキテクチャの新しい形式の導入や、計算機と通信技術の融合などにより、さらに顕著なものになるう。

このように、スーパーコンピュータと並列アルゴリズム、LAN (local area network)、セキュリティやプライバシーなどの問題が、活発な科学者や技術者によって特に重要なものになっている。これらの主題などについて、現在与え得る最新の説明をしようというのが、本シリーズの目的である。

以上のようなモノグラフのシリーズで、並列処理の分野を一番最初に取り上げるのが最も適切である。いくつかのベクトル・プロセッサ、アレイ・プロセッサは商用化されているし、過去5年間、並列アルゴリズムの設計、構成、解析に不断的な努力が傾注されてきているからである。並列プロセッサはすでに、気象学、蛋白質結晶学、動的計画法と最適化、信号処理、分子エレクトロニクスの研究などの多様なトピックスを含む非常に広範囲の問題に適用されてきている。

計算機ネットワークの発展は、並列処理装置を急増しつつある科学者や技術者の手の届くところにもたらした。したがって本書の目的は、これら実際の仕事に携わる人達や、大学の学部3年生の学生達に、これらの強力な技術を構成する際に役立つ方法を与えると同様に、これらの問題の一般的な最新の展望を与えようとするものである。

M. H. Rogers

まえがき

1980年代はまさに並列計算機のための10年であるといえよう。したがって、並列計算機に関するまとまった入門書をとというのが本書の目的である。

1950年代以後、並列および同時操作の例となる多数の計算機が発表されてきたが、数値のベクトルおよび行列に対して効果的に操作するために並列処理を特別に使用するよう設計された最初の計算機が現われたのは1974-1975年であり、これらの計算機は2つのタイプに分けられる。1つは工場での組立ラインにおけると同様の方法で、算術演算の種々の副機能を時間的に並列に実行する、CDC STAR 100やTI ASCのようなパイプライン計算機であり[†]、もう1つは完全な算術演算ユニットを多数配列して空間的に並列処理する、ILLIAC IVのようなプロセッサアレイ計算機である[†]。

これらの初期の設計においては多くの問題があったが、1980年までにいくつかの大メーカーが、以前のように研究プロジェクトとしてではなく、商用ベースで並列計算機を供給している。主な例としては、CRAY-1（実際に一番最初1976年に設置）とCDC CYBER 205パイプライン計算機と、ICL DAPとBurroughs BSPプロセッサアレイ計算機がある。BSPに関しては、原型となる計算機は製造されたものの、商業用としては種々の問題点があり、Burroughsは残念ながらこのプロジェクトから撤退してしまった。しかしながら、この計算機はやはり非常に面白い設計であり、その設計思想の公表はこの分野により深い洞察を与えてくれるだろう。

パイプライン設計はまた、信号処理や地震データの解析のためのミニコンピュータに付加するためのプロセッサとして普及しつつあるし、マイクロプロセッサに基づくシステムへの付加装置としても一般化しつつある。例としては、FPS AP-120B、FPS-164、Data General AP/130、IBM 3838がある。

回路速度の向上だけでは要求する性能を得ることができないので、上述の設

[†]（訳注）それぞれ時分割型並列処理、空間分割型並列処理といえる。

計で並列性が導入されたわけである。このことはまた、NASA Ames で提案された NASF (National Aeronautics Simulation Facility) に対してなされた設計の検討においても明らかである。これは1秒間に 10^6 回の浮動小数点演算の能力をもつ計算機に基づいている[†]。この計算機に対する CDC の提案は、高性能の4個のパイプライン装置からなるが、これに対して Burroughs の設計は512個の同一の演算ユニットのアレイである。信頼性のあるチップ製造プロセスとしての超 LSI (VLSI) の発展は、単一の処理要素 (processor element; PE) の非常に大きなアレイを製造できる技術を可能にした。ICL DAP (4096 PE) と Goodyear Aerospace MPP は、VLSI 技術を利用して発展が期待されるプロセッサアレイである。上述の設計は単に科学技術の大研究所に対してのみ興味があり、計算機ユーザの大多数にはたいして影響がないものだという議論もあるかもしれないが、最初は科学技術的なマーケットに対して開発された計算機アーキテクチャが、のちに汎用の計算機の方式となったという経験は沢山ある。

高度の並列性をもつ設計を可能にする VLSI 技術と相俟って、計算機アーキテクチャにおける並列性は1980年代において大きく成長しようとしている。したがって本書の目的は、パイプラインとプロセッサアレイ両方の設計の原理を説明し、分類し、これらの原理が実際に成功をおさめた現在の計算機の設計にどのように生かされたかを示し、それぞれの設計の多数の本質的な応用 (行列演算, FFT, ポアソン解など) に対する性能を比較することである。高度な並列アーキテクチャの進歩はまた、それらに対して効率的に実行する数値アルゴリズムを設計する問題と、これらのアルゴリズムを表現する計算機言語の問題を導入した。われわれは並列性のアルゴリズムと言語の局面を、アーキテクチャと同じくらいに重要であるとみなし、特にそれらのためにそれぞれ1章を充当している。

われわれの取扱いで新しいと思われる特徴は、計算機の性能の2つのパラメータによる記述である。すなわち、ふつうの1秒当りの浮動小数点演算における最大性能 r_m のほかに、半性能長 $n_{1/2}$ を導入する。これは最大性能の半分を得るのに必要なベクトルの長さである。この変数はまた設計における並列度の

[†] (訳注) すなわち、1000 MFLOPS=1 GFLOPS.

尺度とみなすことができ、直列計算機に対する $n_2 = 0$ より、無限個のプロセッサよりなるプロセッサアレイに対する $n_2 = \infty$ まで変化する。このようにこの2番目のパラメータは、並列設計を並列度の尺度により特徴付けられたスペクトラムに非常にうまく分類してくれる。したがってそれは、“私の計算機はどの程度並列なのか？”という質問に答えてくれる。また n_2 は最も効率的なアルゴリズムの選択を量的に決定してくれるという事実も同じく重要である。だからそれはまた、“私の並列計算機で使うべき最良のアルゴリズムは何でしょう？”という質問に答えてくれる。

また、われわれは計算機の全体のアーキテクチャを数行で表現できるようにした代数的な構造表記法を導入した。これにより、冗長な記述の必要性をなくし、公式による一般的な記述により設計の分類を可能にした。

本書の材料のほとんどは、Reading 大学の計算機科学科で“計算機アーキテクチャ特論”と題して行なわれた講義から集めたものである。このコースは過去5年間にわたり40回の講義に発展したが、この方面の適当なテキストがなかったことが、本書を書こうと志す動機となった。この講義コースは、学部3年生の選択科目として与えられたが、しかし修士レベルの特別コースとしても適当であろうし、また並列計算の一般的な分野において博士論文を準備中の博士コースの学生への教授材料としても適当であろう。

原稿の準備中、多数の人達が議論や論評により援助してくれた。これらの人達の中で、われわれは Reading 大学の同僚、特に Jim Craigie, John Graham, Roger Loader, John Ogden, John Roberts, Shirley Williams の各氏と、Southampton 大学の Henry Kemhadjian 氏の名前を挙げたい。Reading 大学の副総長の Ewan Page 博士とこのモノグラフのシリーズ編者である Bristol 大学の M. J. Rogers 教授はまた原稿の改良を示唆してくれた。われわれはまた計算機のメーカーの代表者から情報や写真の提供など寛大な援助を受けた。その中でも特に、ICL Research and Advanced Development Centre, Stevenage の Pete Flanders, David Hunt, Stewart Reddaway の各氏；ICL Euston の John Smallbone 氏；ICL と London 大学 Queen Mary カレッジの Dennis Parkinson 教授；CRAY Research, Bracknell の Stuart Drayton, Mick Dungworth, Jeff Taylor の各氏；Control Data Corporation (UK) の David Barkai, Nigel Payne の両氏；CDC Minneapolis の Patricia Con-

way, Neil Lincoln, Chuck Purcell の各氏; Burroughs, Paloi の J. H. Austin 氏; Burroughs, London の G. Tillot 氏; Goodyear Aerospace, Akron の C. T. Mickelson 氏; Floating Point Systems, Bracknell の John Harte, David Head, Steve Markham の各氏に感謝する。多くの誤りも原稿を完璧な熟練さでタイプしてくれた Ms. Jill Dickinson (現在 Mrs. Contla) によって訂正された。

われわれはこの書物を計算機設計者に捧げる。かれらの直感と献身的努力がなければ、われわれはこのような興味あるいろいろの設計を研究し、分類し、使用することはできなかったであろう。計算機の設計は必然的に設計チームの努力によるものであるが、われわれが詳細な研究の対象として選んだ計算機の設計の推進者である、Seymour Cray, Neil Lincoln, George O'Leary, Stewart Reddaway にとくに感謝の意を表する。

R. W. Hockney

C. R. Jesshope

—訳者紹介—

おく かわ しゅん じ
奥 川 峻 史

昭和34年京都大学工学部電子工学科卒業

NHK, 京都大学工学部を経て

現在, 京都産業大学教授 (理学部計算機科学教室)

京都大学工学博士

専攻 論理設計, アーキテクチャ

くろ ずみ よし すぎ
黒 住 梓 祐

昭和38年京都大学工学部数理工学科卒業

現在, 京都産業大学教授 (計算機科学研究所長)

京都大学工学博士

専攻 計算機言語, 画像処理

訳者まえがき

著者のまえがきにもあるように、1980年代は並列計算機の時代といえよう。素子的にはさらにGaAs半導体やジョセフソン素子などの開発によって高速化されるだろうが、この面の高速化は物理的に限界に近づいており、そう何桁もの大幅な進歩を期待するわけにはいかない。一方、高速計算機への要求は多方面でいくらでもあり、高速計算機の実現がまたさらに新しい要求を生みだすといった状況である。

このようなわけで、並列計算機の研究は非常に重要であり、単にアーキテクチャだけでなく、並列計算機向きの解法アルゴリズムの研究、さらにそのアルゴリズムをプログラムするための並列プログラミング言語の開発が必須である。また、並列計算機は単に超高性能のいわゆるスーパーコンピュータだけでなく、非常に廉価になったマイクロプロセッサを多数使用して安価でかなりの性能をもった価格性能比のよい計算機を実現する上でも重要な技術である。

本書は、並列計算機の基礎から、パイプライン計算機およびプロセッサアレイ型の計算機のアーキテクチャ、並列アルゴリズム、並列言語についての最新の研究を一冊にわかりやすく系統的にまとめた最初の書物である。大学の学部高学年および大学院の学生に対する教科書として好適であり、またすでに第一線で活躍中の技術者に対しても知識の整理、今後の新しい計算機の開発のために大いに役立つと思う。

原著は第1, 2, 5章を R. W. Hockney 教授が執筆し、第3, 4, 6章を C. R. Jesshope 教授が執筆している。

翻訳は第1, 2, 3, 6章を奥川峻史が、第4, 5章を黒住祥祐が担当し、とりまとめを奥川が行なった。訳語の統一をはかり、訳文も十分チェックして正確を期したつもりであるが、訳者の思い違いがあるかもしれない。ご叱正、ご教示を賜われれば誠に幸いである。

なお、原著は423頁に及ぶ大著であり、原著の本質を損うことなく訳書を比較的入手しやすい価格に押さえるため、原著者と出版社の了解の下に一部省略

した。第1章のやや冗長と思える §1.1 の並列性の歴史では、古い計算機に関する記述を省略して簡潔にまとめた。第2章の FPS 120B に関しては、アーキテクチャの項のみ残して他を省略した。第3章のすでに製造を中止した BSP については、アーキテクチャの項の中のプロセッサアレイの部分のみを残して他を省略した。第4章では、これに関連して BSP のコンパイラと FORTRAN に関する項を省略した。第6章では、技術の節を省略した。なお第2, 3章において、計算機の外観や IC, プリント板などの写真は省略し、これに関する記述も省略した。ハードウェア技術そのものは現在の最先端のものに比較すれば少し古いものであり、アーキテクチャを理解し、今後の新しい計算機的设计に役立てるためには、省略しても原著者の「哲学」を損うことはないと考えた。抄訳に同意して下さり、訳者からの疑問点の問合せに対して親切に回答し、参考資料まで送ってくださった原著者に感謝の意を表する。

また参考のために、訳者付録に最近世界の注目を浴びている国産3社のスーパーコンピュータ FACOM VP, HITAC S-810, NEC SX のアーキテクチャと性能を, CRAY-1, CYBER 205 と対比して、一覧表にまとめ付け加えているが、この中にハードウェア技術の進歩も若干含ませている。

最後に、本書の翻訳の機会を与え、いろいろご教示して下さった共立出版株式会社編集部 坂野一寿氏に心からお礼申し上げ、本書が並列計算機の実習、研究に大いに役立つことを確信し、できるだけ多くの方に読んでいただくことを切望するものである。

1984年8月

奥川峻史

目次

序/i

まえがき/ii

訳者まえがき/vi

第1章 はじめに/1

1.1 並列性の歴史/2

1.2 設計の分類/8

1.2.1 並列性のレベル/9

1.2.2 フリンの分類/11

1.2.3 ショアの分類/12

1.2.4 構造表記法/14

1.2.5 構造の分類/25

1.3 性能の特性表現/27

1.3.1 直列, パイプライン, プロセッサアレイ・アーキテクチャ/29

1.3.2 ベクトルに対する性能/31

1.3.3 $n_{1/2}$ と r_{∞} の測定/32

1.3.4 計算機のスペクトラム/35

1.3.5 プログラムの効率/39

1.3.6 計算機システムの性能/43

第2章 パイプライン計算機/47

2.1 選択と比較/47

2.2 CRAY-1/48

2.2.1 アーキテクチャ/48

2.2.2 命令セット/58

2.2.3	ソフトウェア/63
2.2.4	性能/64
2.3	CYBER 205/72
2.3.1	アーキテクチャ/72
2.3.2	命令セット/80
2.3.3	ソフトウェア/87
2.3.4	性能/91
2.4	FPS AP-120B/96
2.4.1	アーキテクチャ/97
第3章	プロセッサアレイ/103
3.1	プロセッサアレイとは/103
3.1.1	全体的な構成/104
3.1.2	処理能力の分散/106
3.1.3	メモリの構成/113
3.1.4	制御の構成/118
3.2	スイッチング・ネットワーク/120
3.2.1	はじめに/120
3.2.2	基本的な置換/122
3.2.3	置換代数/127
3.2.4	単一段ネットワークまたはスイッチ/128
3.2.5	単一段ネットワークの性質/133
3.2.6	多段ネットワーク/136
3.3	ICL DAP/141
3.3.1	アーキテクチャ/142
3.3.2	命令セット/146
3.3.3	処理モードとメモリマッピング/149
3.3.4	システム/152
3.3.5	性能/154
3.4	Burroughs BSP/156
3.4.1	アーキテクチャ/156

第4章 並列言語／161

4.1 概論／161

4.1.1 並列度／161

4.1.2 並列度の法則／162

4.1.3 並列度の生成／162

4.1.4 並列度の記述／164

4.1.5 並列度の限界／164

4.2 並列構造／164

4.2.1 データ構造と配列／165

4.2.2 配列構造の選択／166

4.2.3 配列の整合／172

4.2.4 配列の変形／173

4.2.5 式の添字化／176

4.2.6 配列代入／176

4.2.7 プログラム例／176

4.2.8 標準仕様／180

4.3 ベクトル・コンパイラ／181

4.3.1 基本技法／181

4.3.2 ベクトル化への障壁／182

4.3.3 CRAY-1 CFT コンパイラ／184

4.4 専用並列コンパイラの表現／184

4.4.1 CFD コンパイラ／185

4.4.2 DAP FORTRAN コンパイラ／188

4.5 並列コンパイラの表現／192

4.5.1 VECTRAN／193

4.6 移植性／196

4.6.1 標準 FORTRAN 使用／196

4.6.2 ソースプログラムの翻訳／197

第5章 並列アルゴリズム／199

5.1 概説／199

- 5.1.1 プログラムとアルゴリズムの効率/199
- 5.1.2 並列度/200
- 5.1.3 パラ計算機と効率/201
- 5.1.4 経路(転送)遅れ/202
- 5.1.5 メモリバンク衝突/202
- 5.2 漸化式/203
 - 5.2.1 順序和/204
 - 5.2.2 縦続和/205
 - 5.2.3 比効率/207
 - 5.2.4 巡回縮約/211
- 5.3 行列乗算/215
 - 5.3.1 内積法/216
 - 5.3.2 中間積法/216
 - 5.3.3 外積法/217
 - 5.3.4 並列度 n^3 /218
- 5.4 3対角方程式/220
 - 5.4.1 ガウス消去法/220
 - 5.4.2 リカーシブ・ダブル法/222
 - 5.4.3 巡回縮約/224
 - 5.4.4 アルゴリズム選択/230
- 5.5 変換/234
 - 5.5.1 高速フーリエ変換/234
 - 5.5.2 FFT の誘導/237
 - 5.5.3 ベクトル化/240
 - 5.5.4 並列化/245
 - 5.5.5 経路と転送/250
 - 5.5.6 整数定理変換/255
- 5.6 偏微分方程式/260
 - 5.6.1 反復法 SOR, SLOR, ADI/260
 - 5.6.2 直接法/266
 - 5.6.3 3次元法/273

第6章 今後の発展/275

6.1 設計の制限事項/275

6.1.1 メモリ構成/275

6.1.2 データのアクセスと整列/278

6.1.3 並列度のスケーリング/282

6.1.4 他の方法/285

6.2 今後のスーパーコンピュータの例/286

6.2.1 CDC NASF 設計/287

6.2.2 Burroughs NASF 設計/290

6.2.3 Goodyear Aerospace MPP/293

付録/297

訳者付録/302

参考文献/305

索引/317

第1章 はじめに

本章では、並列計算機の発展の歴史を振り返り、それらを分類するのに適用される原理を明らかにし、相対的な性能の表記法について述べる。並列計算機を効率的に利用するために、プログラマはプロセッサ、メモリ・モジュール、入出力チャンネルの型や台数、そしてこれらがどのように制御され結合されているか、を熟知しておかねばならない。

第2章と第3章では、それぞれパイプライン (pipeline) とプロセッサアレイ (processor array) 計算機のアーキテクチャ (architecture) を述べる。これらの範疇におけるすべての設計を包括的に記述するのは実際的でない。その代わりに、かなりの台数が市販される可能性があり、しかも同じ問題に対していくつかの異なった方法を示せるように十分に構造の相違した、本質的に商業的に利用可能な計算機を選択している。第2章で述べるパイプライン計算機は、CRAY-1, CYBER 205, FPS の AP-120B であり、第3章で述べるプロセッサアレイは ICL DAP と Burroughs の BSP である。第6章の将来の発展の議論においては、技術の基本と並列計算機における他の設計の限界を考察する。そして、NASA に対して 1980 年代のアーキテクチャとして提案された2つの設計研究について述べる[†]。

新しいアーキテクチャ上の特徴は、もしユーザがその発展を利用しようとするならば、新しい計算機言語と新しい数値計算アルゴリズムを要求する。1次元もしくは時として2次元のデータのリストを最も効率よく処理するように設計された並列計算機の場合には、計算機言語にベクトルまたは行列の数学的概念を導入し、データのベクトル処理に対する適応性に関してアルゴリズムを解析することにより、最もふつうに達成できる。良い計算機言語はまたプログラミングの容易さに大きく影響を及ぼすが、第4章では、標準 FORTRAN

[†] (訳注) その他、最近の国産スーパーコンピュータを訳者が付録 (302頁) に付け加えている。

(§4.3), マシン並列性の表現 (§4.4), 問題の並列性の表現 (§4.5) のそれぞれの観点から, 並列言語 (parallel language) について述べる。

並列計算機の有用性は適当な並列アルゴリズム (parallel algorithm) の発見と選択に依存するが, 第5章で並列計算機上におけるアルゴリズムの効率の評価に対する原理を確立する。これらはそれから反復法, 行列乗算, 3対角線型方程式, 変換, ある種の偏微分方程式に対するアルゴリズムの選択に適用する。

われわれの議論はおよそ1980年における状況に基づいているが, 計算機アーキテクチャが将来さらに発展しても読者が適用できるような原理を確立しようとしている。われわれの目的は, それらのアーキテクチャを分類し, それらの性能を特性づけることにより, 読者が新しい設計を評価することを可能とし, それによってある特定の問題を解くための適当なアルゴリズムと言語を選択することができるようにすることである。

1.1 並列性の歴史

図1.1に示すように, 計算時間は大ざっぱにいて5年ごとに10倍高速化されてきている。

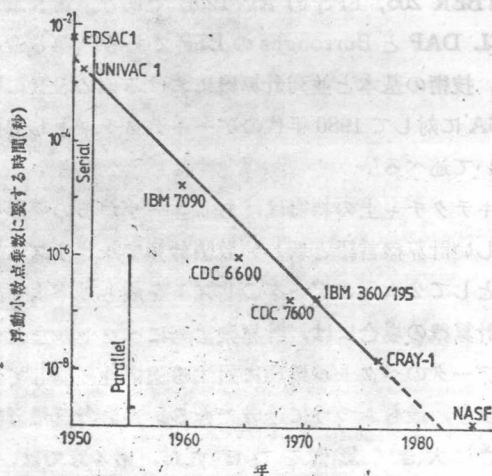


図 1.1 1950 年以來の計算機の算術演算速度の歴史