COMPUTER
ARCHITECTURE

John L. Hennessy ▮ David A. Patterson

A Quantitative Approach

ヘネシー ▮ パターソン

コンピュータアーキテクチャ

定量的アプローチ［第6版］

ジョン・L・ヘネシー 、デイビッド・A・パターソン
中條拓伯、天野英晴、鈴木 貢 訳

SiB access

The edition of ***Computer Architecture: A Quantitative Approach*, 6e** by **John L. Hennessy, David A. Patterson (ISBN: 978-0128119051)** are published by arrangement with Elsevier Inc.

［邦題：ヘネシー ■ パターソン　コンピュータアーキテクチャ：定量的アプローチ［第 6 版］］

Andrea、Linda、および 4 人の我々の息子に捧ぐ

チューリング賞受賞の著者

ジョン・L・ヘネシー（John L. Hennessy）は、1977 年からスタンフォード大学の Department of Electrical Engineering and Computer Science に所属し、2000 年から 2016 年の間、同大学の学長を務め、現在は Knight-Hennessy Fellowship の理事である。さらに IEEE と ACM のフェローであり、全米技術アカデミーとアメリカ芸術科学アカデミーの会員である。2001 年に RISC 技術への貢献により Eckert-Mauchly Award を受賞、2001 年に Seymour Cray Computer Engineering Award を受賞、2000 年には John von Neumann Award をデイビッド・パターソンと共同受賞、他数多くの賞を受賞している。また、10 の名誉博士を授与されている。

1981 年、彼はスタンフォード大学で大学院生とともに MIPS プロジェクトを開始した。1984 年、プロジェクトを終わらせた後、1 年の研究休暇の間に、MIPS Computer Systems を共同起業し、最初の商用 RISC マイクロプロセッサを開発した。2017 年の時点で 50 億個をこえる MIPS マイクロプロセッサが、ビデオゲームやパームトップコンピュータからレーザープリンタやネットワークスイッチに至る機器に組み込まれている。彼は続いて最初の拡張可能なキャッシュ透過型マルチプロセッサのプロトタイプである DASH（Director Architecture for Shared Memory）プロジェクトを率いた。このプロジェクトは、現代的なマルチプロセッサで採用されている多くの重要なアイデアを生み出した。技術的な功績や大学での教育に加えて、多くの企業の立ち上げで初期段階のアドバイスや投資を継続して行っている。

［編集補足：ヘネシーは現在 Google 社持ち株会社 Alphabet 社の会長で、本書の共著者ディビッド・パターソンと共に、「2017 年度チューリング賞」を 2018 年に受賞している。］

デイビッド・A・パターソン（David A. Patterson）は、カリフォルニア大学（UC）バークレーでの 40 年にわたる教員活動の後に、2016 年に Google に移り、Distinguished Engineer に就任した。彼は UCLA 卒業後、直ちに UC バークレーの一員となった。彼は現在も 1 週間のうち 1 日は、バークレーで計算機科学の名誉教授として生活を送っている。カリフォルニア大学から教育活動に対して Distinguished Teaching Award を、ACM から Karlstrom Award を、IEEE から Mulligan Education Medal と Undergraduate Teaching Award を受賞している。パターソンは RISC への貢献により IEEE Technical Achievement Award と ACM Eckert-mauchly Award を、RAID（Redundant Arrays of Inexpensive Disks）に対する貢献により IEEE Johnson Information Storage Award を共同受賞している。また、IEEE John von Neumann Medal と C & C 賞をヘネシーと共同受賞している。ヘネシーと同じくパターソンは、アメリカ芸術科学アカデミー、コンピュータ歴史博物館 、ACM、および IEEE のフェローであり、全米技術アカデミー、米国科学アカデミー、および Silicon Valley Engineering Hall of Fame に選出されている。彼はアメリカ大統領の情報技術についてのアドバイザリコミッティ、US バークレーの EECS 学科の CS 学科の学科長、Computing Research Association の委員長、ACM 会長を務めた。この功績によって ACM、CRA、そして SIGRCH より、功労賞を受賞した。彼は現在、RISC-V Foundation の取締役副会長である。

US バークレーで、パターソンは最初の VLSI RISC である RISC I の設計と実装を指導した。この研究は商用 SPARC アーキテクチャの基礎となった（これは現在でも SUN Microsystems、富士通他で用いられている）。彼は RAID プロジェクトの指導者であり、多くの企業による高信頼性ディスクの開発に結び付いた。彼は、Network of Workstations（NOW）プロジェクトにも参画し、このプロジェクトは、インターネット企業によるクラスタ技術や、のちにクラウドコンピューティングに結び付いた。彼の現在の興味は、機械学習のための領域特化アーキテクチャの設計や、Open RISC-V 命令セットアーキテクチャの普及活動、そして UC Berkeley RISELab（Real-time Intelligent Secure Execution）の支援にある。

［編集補足：2018 年、本書共著者ジョン・ヘネシーと共に「2017 年度チューリング賞」を受賞している。］

序　文

Norman P. Jouppi、Google

この 40 年間の計算機の性能向上の多くは、Moore の法則と Dennard スケーリングが牽引した大規模かつ並列度が高いシステムによるコンピュータアーキテクチャの進歩に依っている。Moore の法則は、集積可能なトランジスタの数が 2 年で倍になるということである。Dennard スケーリングは、MOS の電源電圧が下がるのと同時に形状も小さくなれば、電力密度はほぼ一定であるということである。10 年前に Dennard スケーリングが終焉を迎え、Moore の法則が物理的、あるいは経済的な要因による最近の鈍化を考慮すると、我々の業界における卓越した教科書の第 6 版ほど、時宜を得たものはないだろう。その理由は以下の通り。

第一の理由は、領域特化アーキテクチャは、過去の Moore の法則と Dennard スケーリングにおける 3 世代分に匹敵する電力と性能の恩恵をもたらし、汎用アーキテクチャの未来の拡張よりも優れた実装を供することにある。そして、計算機応用の領域が多様化している今日、領域特化アーキテクチャによるアーキテクチャ革命の対象となり得る潜在的な領域がたくさん転がっている。

第二の理由は、オープンソースアーキテクチャの上質な実装は、Moore の法則が鈍化したためにより長い寿命を有するようになったこと。これにより、最適化と改良を継続する機会が増え、そうする価値が生じてきた。

第三の理由は、Moore の法則が鈍化したために、異なる技術要素がヘテロジニアスに規模拡大してきたこと。さらに、2.5 次元積層や、新型の不揮発性メモリ、光学的内部接続のような新しい技術が開発され、Moore の法則が単体で頑張るのを補うようになったこと。これらの新技術を使い、均質でない規模拡大を効果的に用いるには、最初の原理から設計上の決定を再検討する必要がある。したがって学生、教員、産業界の実務家を問わず、古きから最新に至るアーキテクチャの技術を身に着けることは重要である。結局のところ領域特化アーキテクチャは、コンピュータアーキテクチャ界における、25 年前の命令レベル並列性でのゴールドラッシュ以来の、ワクワクドキドキであると信じる。

この版における大きな変更は、領域特化アーキテクチャの章を加えたことである。特別な領域特化アーキテクチャは、汎用プロセッサの実装に比べて、高い性能と、低い消費電力、少ないシリコン面積を達成できることは既知であった。しかし、汎用プロセッサが単一スレッドでの性能を年に 40%向上（図 1.11 を参照）してきた間は、専用アーキテクチャを開発するのに要する余計な時間と、最新の標準マイクロプロセッサの利用が対決すると、専用アーキテクチャの利点を以てしても多くが負けていた。一方で単一コアの性能の伸びがとても鈍くなった今日では、以前とは異なり、最新の汎用プロセッサ技術を以てしても、専用アーキテクチャが陳腐化しない状況が長く続くことを意味する。第 7 章ではいくつかの領域特化アーキテクチャを取り扱っている。ディープニューラルネットからは最も大量だが低いデータ精度で済む計算の要求がある。この組み合わせは、専用アーキテクチャから大きな恩恵を受けられる。ディープニューラルネットのための 2 つのアーキテクチャの実装例が示されている。1 つ目は推論に最適化されており、2 つ目は学習に最適化されている。画像処理はもう 1 つの領域の例題であり、大量の計算という要求の一方で、低い精度のデータ型という恩恵がある。さらにこの例題はモバイルデバイスで必要とされることが多いので、専用アーキテクチャによる低消費電力化は非常に有益である。最後に、本質的に再プログラミング可能であるので、FPGA に基づくアクセラレータは 1 つのデバイスで多様な領域特化アーキテクチャを実現するのに使うことができる。これらは、ネット検索のように頻繁に更新される非定型のアプリケーションで利がある。

アーキテクチャという重要な概念は永遠であるので、この版は最も新しく開発された技術やコスト、例題、そして参考文献によって全体的に更新されている。オープンソースのアーキテクチャにおける最近の開発のペースに合わせて、本書では RISC-V 命令セットアーキテクチャを使うように刷新した。

個人的なコメントとして、ヘネシー先生の博士課程の学生として一緒に研究する機会の後に、現在は Google でパターソン氏の下で働くという機会を得ている。まあ、なんと素晴らしい上司の組み合わせ！

コンピュータアーキテクチャ：定量的アプローチ［第6版］推薦の言葉

アーキテクチャという重要な概念は永遠であるので、この版は最も新しく開発された技術やコスト、例題、そして参考文献によって全体的に更新されている。オープンソースのアーキテクチャにおける最近の開発のペースに合わせて、本書では RISC-V 命令セットアーキテクチャを使うように刷新した。

—序文から、Norman P. Jouppi、Google

『コンピュータアーキテクチャ：定量的アプローチ』は良質なワインのようにますます美味しくなってきた。最初に買ったのは学部卒業の時で、今でも最も頻繁に見る教科書の１つである。

—James Hamilton、Amazon Web Service

ヘネシーとパターソンが本書の最初の版を著したのは、修士課程の学生が５万トランジスタの計算機を構成するような時であった。今日では、ウェアハウス規模の計算機群は、各々が数ダースの独立したプロセッサと数十億のトランジスタから成る沢山のサーバで構成されている。コンピュータアーキテクチャの進化は急速で半端でない。『コンピュータアーキテクチャ：定量的アプローチ』は出版のペースを保ちつつその各版で、新規に登場した重要なアイデアであってこの業界を盛り上げているものを取り上げ、正確な説明と解析を行っている。

—James Larus、Microsoft Research

旧版に対するもう１つの時宜を得た関連性のある追加内容は、半端でなく興奮させるコンピュータアーキテクチャの進化への１つの窓である！ Moore の法則の鈍化に対するこの版の新しい議論と未来のシステムへの示唆は、コンピュータアーキテクトやシステムの実務家の広範囲に渡って必読である。

—Parthasarathy (Partha) Ranganathan、Google

私は『定量的アプローチ』を取る本を愛する、というのはそれらがエンジニアによるエンジニアのためのものであるからだ。ジョン・ヘネシーとデーブ・パターソンは数学が課す限界と物性物理学がもたらす可能性を示す。彼らは現実の例を使って、アーキテクトが実働システムを構成するのに、どのように解析し、測定し、妥協するのかを教示している。この第６版は、Moore の法則が終焉を迎え、深層学習が前例のないほど計算サイクルを要求しているという、絶妙なタイミングで出版された。領域特化アーキテクチャの章では、いくつかの有望なアプローチを説明し、コンピュータアーキテクチャにおける１つの復興を予想している。ヨーロッパのルネサンスのさなかの学者と同様に、コンピュータアーキテクトは我々の歴史を理解しなければならない。そして、歴史の教訓と新技術を結合し、世界を再構成するのだ。

—Cliff Young、Google

まえがき

我々がこの本を書いた理由

本書の 6 つの版を通じて、我々のゴールは、明日への技術的発展となろう基本的原則を繙くことであった。コンピュータアーキテクチャにおいて、こういった機会をいただいているという興奮は今でも冷めることはなく、初版で この分野について書いたことをもう一度繰り返そう。

> 「これは決して動くことのないペーパーマシンについて語るようなつまらない科学の話ではない。断じて違う！ 切れ味鋭い知的興味に端を発する学問であり、市場からのコスト–性能–消費電力に関する要求圧力に対しバランスをうまく取りながら、結果として、栄誉ある失敗とともに、重要な成功に導いてくれるのである。」

最初の版を書いた時に、我々が主に掲げた目的は、人々がコンピュータアーキテクチャを学び、それについて考える方法を変えることであった。このゴールは依然として変わっておらず、今もなお重要であると感じている。この分野は日進月歩であり、全く現実感のない定義や設計を集めたものではなく、実際の例と現実のコンピュータを用いた測定結果により学ばなければならない。我々は今までに我々と考えを共にする人々は誰でも熱烈に歓迎し、今またこれに加わろうとする人たちを同じように迎え入れている。いずれにせよ、現実のシステムに対して、同じ定量的アプローチと分析ができることを約束しよう。

以前の版と同じように、我々は、新しい版が、先進的コンピュータアーキテクチャと設計の授業で使ってもらえるように、プロの技術者とアーキテクトにとって役に立つようにと努力してきた。最初の版のように、この版は新たなプラットフォーム――パーソナルモバイルデバイスやウェアハウススケールコンピュータ――、および新しいアーキテクチャ――特に領域特化アーキテクチャ――に鮮明な焦点を当てている。以前の版と同じように、この版はコスト–性能–電力のトレードオフと優れた技術的デザインに重点を置いて、コンピュータアーキテクチャを解き明かしている。我々は、この分野が成熟し続け、厳格な定量的基礎に裏打ちされた長く確立された科学技術の学問へと向かうと信じている。

この版について

Moor の法則や Dennard 則が終焉したことは、コンピュータアーキテクチャに対してマルチコアへの切り替えという大きなインパクトになった。本書では引き続き、携帯電話やタブレット等のパーソナルモバイルデバイス（PMD）のクライアントから、クラウドコンピューティングのサーバであるウェアハウススケールコンピュータに至るまでの、コンピューティングのサイズを深掘りする。さらにそれらの中にある別の並列性のテーマである**データレベル並列性**（DLP）については第 1 章と第 4 章で、**命令レベル並列性**（ILP）については第 3 章で、**スレッドレベル並列性**については第 5 章で、そして要**求レベル並列性**（RLP）については第 6 章で詳述する。

この版における最も広範囲な変更は、命令セットを MIPS から RISC-V に切り替えたことである。この現代的でモジュール化されたオープンの命令セットが、情報技術産業に大きな影響を与えるのかは未知数である。このアーキテクチャはオペレーティングシステム界における Linux と同様の重要性を持つようになるかもしれない。

この版で新規に追加したのは第 7 章で、産業界の実際の例をいくつか示しながら、**領域特化アーキテクチャ**を紹介している。

以前と同様に本書の最初の 3 つの付録は、*Computer Organization and Design*[†] のような本を読んだことがない読者を対象にして、RISC-V 命令セット、メモリ階層、そしてパイプラインについて基礎的な解説を行っている。本書のコストを下げながら興味がある読者を満足させるために、付録を含む補助教材を次の URL からオンラインで取得可能である：`https://www.elsevier.com/books-and-journals/book-companion/ 9780128119051`。なんと付録のページ数の方が本書のページ数よりも多い！

この版でも引き続き、アイデアの例示を現実の例を使って行うという伝統を守っており、「総合的な実例」の節は一新されている。この版の「総合的な実例」には、ARM Coretex-A53 プロセッサや Intel Core i7 プロセッサのパイプライン構成やメモリ階層、Google ウェアハウスコンピュータの 1 つが含まれている。

話題の選択と構成

従来通り、話題の選択については保守的なアプローチを取っている。というのも、この分野では、基礎的な原則を取り扱うことでそこそこにカバーできるアイデアよりも、もっと興味深いアイデアがたくさんあるからである。我々は、読者が出会うかもしれないアーキテクチャをすべて広範囲に渡って調査することは避けるようにした。その代わりに、どのような新たなマシンにでも見受けられる

† 訳注：デイビッド・A・パターソン、ジョン・L・ヘネシー著、成田光彰訳『コンピュータの構成と設計：ハードウェアとソフトウェアのインタフェース』、日経 BP 社刊

ような、核心となる概念を説明するように心がけた。アイデアを選ぶのに鍵となる基準は、そのアイデアが定量的な点における議論に耐えうるほどに十分に検証され、広く利用されているかどうかである。

我々の意図は、他の情報源から同じ形では利用できないものに極力焦点を当てることである。このため、可能な限り先進的な内容であることを強く訴えて続けている。実際、ここに取り上げているシステムの中には、文献では記述が見当たらないものもある（コンピュータアーキテクチャについてもっと基礎的なことに限って興味がある方々には、前掲の『コンピュータの構成と設計』を読んでいただきたい）。

内容の概観

第 1 章では、エネルギー、静的な消費電力、動的な消費電力、半導体のコスト、信頼性、可用性に関する公式を示している（これらの公式は、フロントカバーの内側にも記載してある）。これらを他の章においても活用していただきたい。コンピュータ設計や性能計測の定量的原則の古典的なものに加えて、汎用プロセッサの性能向上の鈍化を示し、これが領域特化アーキテクチャの示唆になっている。

我々の見解では、1990 年代に比べて、命令セットアーキテクチャの果たす役割は低下しており、このため、この内容については付録 A に移動した。ここでは RISC-V アーキテクチャを用いている（すぐに参照できるように、RISC-V の命令セット（ISA）を巻末にまとめてある）。ISA フリークのために、付録 K では 10 種類の RISC アーキテクチャ、80x86、DEC VAX、IBM360/370 について収録している。

それから、第 2 章ではメモリ階層の話題に移る。というのも、価格性能比（コストパフォーマンス）——消費電力の原則をこれに適用するのが容易であり、メモリは他の章にとってもクリティカルなリソースであるからである。以前の版にあるように、付録 B にはキャッシュの原理の導入的なおさらいを含めており、必要な場合に見てもらうためのものである。

第 2 章では、10 種類のキャッシュの先進的な改良技術について論じている。この章では、保護、ソフトウェア管理、ハードウェア管理において有効に働き、クラウドコンピューティングにおいて重要な役割を果たす仮想マシンについて触れている。この章には SRAM や DRAM 技術を対象とするだけでなく、フラッシュメモリに関する新たな技術資料も含まれている。総合的な実例としては、PMD で用いられている ARM Cortex A8 やサーバに利用されている Intel の Core i7 を取り上げている。

第 3 章は、高性能プロセッサにおける命令レベル並列性の利用について述べており、スーパースカラ実行、分岐予測、投機実行、動的スケジューリング、同時マルチスレッドが含まれている。以前に述べたように、必要となる場合に備えて、付録 C はパイプラインのおさらいである。第 3 章においても命令レベル並列性（ILP）の限界についてまとめている。第 2 章と同様に、総合的な実例は、再度 ARM Cortex A53 と Intel Core i7 を取り上げている。第 3 版では、Itanium と VLIW に多くのページを割いたが、この内容については、付録 H に移動し、このアーキテクチャが、以前主張したことに応えなかったといった我々の考え示した。

ゲームや動画処理といったマルチメディアアプリケーションの重要性が増すことによって、データレベル並列性を利用できるアーキテクチャの重要性も増えることとなった。特に、グラフィック処理ユニット（GPU）を用いる計算に対する興味が増していく中、GPU が実際にどのように動作しているのか理解しているアーキテクトがほとんどいない。我々はコンピュータアーキテクチャのこの新しい方式を明らかにするために重きを置き、新たな章を追加することに決めた。第 4 章は、ベクタアーキテクチャの導入から始まるが、これはマルチメディア系の SIMD 命令セット拡張や GPU を説明する上での基本となる（付録 G では、ベクタアーキテクチャについて、さらに深く掘り下げている）。この章ではルーフライン性能モデルを導入し、それを用いて Intel Core i7 と NVIDIA GTX280 GPU、それに Xeon Platium 8180 と NVIDIA P100 GPU とを比較している。この章は PMD 用の Tegra P1 GPU についても述べている。

第 5 章は、マルチコアプロセッサについて述べている。構成原則と性能の両方について精査し、対称メモリおよび分散メモリアーキテクチャについて探究している。本章への第一の追加には、マルチコア-マルチレベルのキャッシュ、マルチコアのコヒーレンス方式、そしてオンチップでのマルチコア相互接続が含まれている。同期やメモリコンシステンシモデルについての話は次に示す。例としては、Intel Core i7 を取り上げた。オンチップの相互結合ネットワークに興味がある読者は付録 F を読むべきであり、さらに大規模な並列計算機や科学技術アプリケーションに興味がある人には、付録 I を用意してあるので、ぜひ読んでいただきたい。

第 6 章はウェアハウススケールコンピュータ（WSC）について述べている。この章は、Google 社と Amazon Web Services のエンジニアの助けで大きく改訂された。この章はほとんどアーキテクトが気にすることのなかった WSC の設計、コスト、性能に関する詳細についてまとめたものである。コストを含めて、WSC のアーキテクチャや物理的な実装について述べる前に、現在注目を集めている MapReduce プログラミングモデルから始めている。そのコストからクラウドコンピューティングが出現したことが説明でき、それによって所属するところにあるデータセンターよりも、クラウドコンピューティングで WSC を用いて計算する方がもっと安くつくことになる。総合的実例では、本書で初めて公表することとなった Google 社の WSC について述べている。

新規追加の第 7 章は、領域特化アーキテクチャ（DSA）の必要性が動機になっている。この章では 4 つの DSA の具体例に基づいて DSA の原理を導き出している。DSA は各々商用機器に配備されたチップに対応している。そしてさらに、単一スレッドの汎用プロセッサの性能がどん詰まりになると、なぜ DSA と呼ばれるコンピュータアーキテクチャのルネサンスが期待されるのかを説明している。

これにより付録 A〜M を用意することとなった。付録 A は、RISC-V64 を含めた命令セットアーキテクチャ（ISA）の原理についてまとめており、付録 K では、RISC-V の 64 ビット版、ARM、MIPS、Power、SPARC、および、これらのマルチメディア拡張について示

してある（80x86、VAX、IBM360/370 といった）古典的なアーキテクチャや、（Thumb-2、microMIPS、RISC-V C といった）広く使われている組み込み用命令セットについても示してある。関連する付録 H では、VLIW 命令セットのアーキテクチャや、そのコンパイラについて述べている。

前に述べたように、付録 B と付録 C はキャッシュやパイプラインの基本的なチュートリアルである。キャッシュについて比較的初心者は、第 2 章の前に付録 B を読むようにし、パイプラインについて初めて知る読者は、第 3 章の前に付録 C を読んでいただきたい。

付録 D の「ストレージシステム」では、信頼性と可用性について突っ込んだ議論を展開しており、RAID6 の方式について述べつつ RAID について解説し、実際のシステムの統計的な障害について扱っている。引き続き、待ち行列理論と入出力性能のベンチマークを紹介している。我々は、Internet Archive という実際のクラスタでコスト、性能、信頼性について評価している。「総合的な実例」では、NetApp FAS6000 ファイルサーバを取り上げている。

付録 E は、Thomas M. Conte によるもので、組み込み関係についてまとめている。

付録 F は、相互結合ネットワークに関するもので、Timothy M. Pinkston と José Duato によってまとめられた。付録 G は、元々は Krste Asanović によって書かれ、ベクタプロセッサについて詳説している。これらの 2 つ付録は、知りうる中で最も素晴らしい解説であると思う。

付録 H は VLIW と Itanium のアーキテクチャである EPIC について述べている。

付録 I では、並列処理アプリケーションと大規模共有メモリ型の並列処理のコヒーレンスプロトコルについて述べている。付録 J は、David Goldberg によるもので、コンピュータの演算法を詳説している。

Abhishek Bhattacharjee による付録 L は新規に追加されたもので、仮想マシンや、非常に広大なアドレス空間のアドレス変換の設計に焦点を当てている。クラウドプロセッサが増えるにつれて、これらのアーキテクチャ的な増強はさらに重要性を増す。

付録 M は、それぞれの章の「歴史展望と参考文献」をまとめて 1 つの付録にしたものである。これは、各章におけるいろんなアイデアがまっとうなものであることを示すとともに、こういった発明を取りまく歴史的なセンスを示すという狙いがある。ここで記したことは、コンピュータ設計における人間ドラマをとして楽しむことができる。この付録は、アーキテクチャの学生にとって必要となるような参考文献も掲載している。もし時間があるならば、ここで紹介する、この分野における古典的な論文のいくつか選んで読んでおくことをお勧めする。それは、なかなか楽しいものであり、直接、発案者からアイデアを聞くことができる点で教育面での効果もある。「歴史展望」は、今までの版で最も人気が高かった部分である。

この教科書の読み方

読者のみなさんには第 1 章から読み始めていただきたいところであるが、そうでない場合は、章と付録を読む順番に関して最善の道が 1 つあるわけではない。すべてを読みたくはないのであれば、次のような順番はどうだろう。

- メモリ階層：付録 B、第 2 章、付録 D、付録 M
- 命令レベル並列性：付録 C、第 3 章、付録 H
- データレベル並列性：第 4 章、第 6 章、第 7 章、付録 G
- スレッドレベル並列性：第 5 章、付録 F、付録 I
- 要求レベル並列性：第 6 章
- ISA：付録 A、付録 K

付録 E はいつ読んでも良いが、ISA とキャッシュを読んだ後に読むのが最も学習効果がある。付録 J は算術演算に関する知識が必要になったらいつでも読んで欲しい。各章をを読み終えた後は付録 M の関連するところを読んでみよう。

章構成

それぞれの章に、同じように発展的な記述の枠組みが設けてある。まずそれぞれの章本体でアイデアを説明する。これを「他の章との関連」で、1 つの章で取り上げたアイデアがどのように他の章に影響を与えるかを示している。その次には「総合的な実例」の節がある。この節は、こういったアイデアがどのように組み合わせて実際のマシンで用いられているのかを示している。

その次に続くのは「誤った考えと落とし穴」の節では、他の人が陥りそうな間違いについて学んでもらうためのものである。すなわち、よくある誤解とか、あなたを待ち受けている、分かってはいても陥ってしまうようなアーキテクチャ上の罠について、実例を挙げている。「誤った考えと落とし穴」の節は、この本で最も人気のある節である。そして、それぞれの章は「おわりに」の節でしめくくっている。

ケーススタディと演習問題

各章の終わりには、ケーススタディとそれに伴う演習問題を付けている。このケーススタディは、産業界や大学の専門家によるもので、鍵となる概念を探り、段階的に演習に取り組んでもらうことで理解度を確かめることができる。このケーススタディは、先生らがこれをベースにして、自分の演習問題を作るのに役立つよう、十分に詳細が示されていることが分かるだろう。

各演習問題にある章、節〈*m.n*〉は、その問題を解くのにまず必要な本書の関連する節に対応している。これは、読者がまだ読んでいない節に関する問題に手を出すのを避けるとともに、元となる情報の参照を容易にすることを狙っている。演習問題には、読者がその問題を解き終えるのに必要な時間について把握してもらうために、難易度が付けてある。

［10］5 分以内（読めばすぐ理解できる）
［15］すべて解くのに 5〜15 分
［20］すべて解くのに 15〜20 分
［25］完全に解答を書きあげるのに 1 時間
［30］短いプログラム作成の課題：プログラミングには、まる 1 日を要しない程度
［40］大掛かりなプログラム作成課題：2 週間くらい必要
［議論］他の人と議論を要する話題

ケーススタディと演習問題の解法については、http://textbooks.

elsevier.comの Web ページに登録すれば参照できるようになっている。

補助的な記述部分

いろいろな教材についてはhttps://www.elsevier.com/books/computer-architecture/hennessy/978-0-12-811905-1において、オンラインで利用可能であり、以下のような内容が含まれている。

- 参考となる付録：いくつかは、そのテーマの専門家によるゲスト著者によるもの、一定の先進的なトピックを扱っている。
- 歴史展望：本書の各章で解説する鍵となるアイデアがどのように発展していったか探ったもの。
- 授業用のパワーポイントスライド
- 本書の図の PDF、JPEG、PPT フォーマット
- 関連する文献の Web へのリンク
- 正誤表

新たな資料や他の有用なものが掲載されている Web へのリンクは、一定の期間毎に付け加える予定である。

本書改善の手助けのお願い

最後に、この本を読んでお小遣いを稼げることができる（コスト性能比について話そう!)。この後の謝辞を読んでいただければ、ミスの訂正に対して延々と連なるリストがあるのがお分かりいただけるだろう。この本は増刷を重ねているため、訂正の機会も多くなる。もし、まだ残っているバグを発見したら、電子メール（ca6bugs@mkp.com）にて出版社まで連絡していただきたい。

我々は本書についてのさまざまなご意見についても受け入れ、もう１つのアドレスであるca6comments@mkp.com宛にメールをお送りいただきたい。

おわりに

繰り返すが、本書は真の意味での共著であり、我々二人が半分の章と半分の付録を書いたものであることを伝えておく。かくも長きにわたり、この仕事の半分を分かち合い、作業がうまくいかないような時にはインスピレーションを交換し合い、難しい概念を説明するために鍵となるような見識を持ち合い、週末を費やして本文を査読し合い、他にいろいろある職務の重みがのしかかって、なかなかペンを持つことができないようような時には、心から同情し合った（我々の履歴書が証明するように、この職務は版を重ねるにつれ、指数的に増大していった)。

それゆえ、繰り返すが、これからお読みいただくものに対しては、その非難をも等しく分け合うつもりでいることをもう一度申し上げておこう。

ジョン・ヘネシー ■ デイビッド・パターソン

謝　辞

本書は単に第 6 版となっているが、実際は、11 種類の版を作成した。最初の版については 3 種類のバージョン（アルファ、ベータ、最終版）があり、第 2 版、第 3 版、第 4 版に対しては、それぞれ 2 つのバージョン（ベータ、最終版）があるのである。その長い道のりの過程で、何百人もの査読者とユーザの助けをお借りした。皆、本書を良くしたいという思いで助けてくれた。それゆえ、この本のいずれかのバージョンに貢献してくれたすべての方々のリストを付けることにした。

第6版の貢献者

旧版同様、本書は大勢のボランティアの方々を含むコミュニティの努力の成果である。彼らの助けなしには、本版がかくも磨き上げられることはなかった。

査読者

Jason D. Bakos、University of South Carolina；Rajeev Balasubramonian、University of Utah；Jose Delgado-Frias、Washington State University；Diana Franklin, The University of Chicago；Norman P. Jouppi、Google；Hugh C. Lauer、Worcester Polytechnic Institute；Gregory Peterson、University of Tennessee；Bill Pierce, Hood College；Parthasarathy Ranganathan、Google；William H. Robinson、Vanderbilt University；Pat Stakem、Johns Hopkins University；Cliff Young、Google；Amr Zaky、University of Santa Clara；Gerald Zarnett、Ryerson University；Huiyang Zhou、North Carolina State University。

California 大学 Berkeley 校 Par 研究室と RAD 研究室メンバー（第 1 章、第 4 章、第 6 章を何度も査読いただき、GPU と WSC に関する解説を形作ってくれた）：Krste Asanović 、Michael Armbrust、Scott Beamer、Sarah Bird、Bryan Catanzaro、Jike Chong、Henry Cook、Derrick Coetzee、Randy Katz、Yunsup Lee、Leo Meyervich、Mark Murphy、Zhangxi Tan、Vasily Volkov、and Andrew Waterman。

付　録

Krste Asanović、University of California, Berkeley（付録 G）；Abhishek Bhattacharjee、Rutgers University（付録 L）；Thomas M. Conte、North Carolina State University（付録 E）；José Duato、Universitat Politècnica de València and Simula（付録 F）；David Goldberg、Xerox PARC（付録 J）；Timothy M. Pinkston、University of Southern California（付録 F）。

Universidad Politècnica de Valencia の José Flich は、付録 F を改訂する上で、重要な貢献をいただいた。

ケーススタディと演習問題

Jason D. Bakos、University of South Carolina（第 3 章と第 4 章）；Rajeev Balasubramonian、University of Utah（第 2 章）；Diana Franklin、University of Chicago（第 1 章と付録 C）；Norman P. Jouppi、Google（第 2 章）；Naveen Muralimanohar、HP Labs（第 2 章）；Gregory Peterson、University of Tennessee（付録 A）；Parthasarathy Ranganathan、Google（第 6 章）；Cliff Young、Google（第 7 章）；Amr Zaky、University of Santa Clara（第 5 章と付録 B）。

Jichuan Chang、Junwhan Ahn、Rama Govindaraju、および Milad Hashemi は、第 6 章におけるケーススタディと演習問題を作成したり、チェックするのにお手伝いいただいた。

追加資料

John Nickolls、Steve Keckler と NVIDIA の Michael Toksvig（第 4 章の NVIDIA GPU）；Intel の Victor Lee（第 4 章の Core i7 と GPU との比較）；LBNL の John Shalf（第 4 章の最近のベクタアーキテクチャ）；LBNL の Sam Williams（第 4 章のコンピュータのルーフラインモデル）；Australian National University の Steve Blackburn とオースチンにある University of Texas（オースチン校）の Kathryn McKinley（第 5 章の Intel 製プロセッサの性能と消費電力の計測）；Google の Luiz Barroso、Urs Hölzle、Jimmy Clidaris、Bob Felderman と Chris Johnson（第 6 章の Google 社の WSC）；Amazon Web Services の James Hamilton（第 6 章の配電とコストモデル）。

University of South Carolina の Jason D. Bakos は、本版の授業用スライドを更新してくれた。

本書は、もちろん出版社なしでは出版することができなかった。すべての Morgan Kaufmann/Elsever のスタッフに、その努力とサポートについて感謝したい。この第 5 版については、特に編集者の Nate McFadden と Steve Merken には、サーベイを調整し、専門委員会をまとめ、ケーススタディと演習問題を発展させ、グループ、査読結果、付録の更新をまとめてくれたことに対し、特別な感謝を捧げたい。

我々の大学のスタッフである Margaret Rowland と Roxana Infante には、数知れない速達の発送とともに、本書のために我々が

作業していた間の、Stanford 大学と California 大学 Berkeley 校の留守を守ってくれたことに感謝したい。

最後となるが、早朝から読んだり、考えたり、書いたりする事態がどんどん増えていく状況に耐え忍んでくれた我々の妻たちに、感謝の思いを捧げたい。

旧版の貢献者

査読者

George Adams、Purdue University；Sarita Adve、University of Illinois at Urbana-Champaign；Jim Archibald、Brigham Young University；Krste Asanović 、Massachusetts Institute of Technology；Jean-Loup Baer、University of Washington；Paul Barr、Northeastern University；Rajendra V. Boppana、University of Texas、San Antonio；Mark Brehob、University of Michigan；Doug Burger、University of Texas、Austin；John Burger、SGI；Michael Butler；Thomas Casavant；Rohit Chandra; Peter Chen、University of Michigan；the classes at SUNY Stony Brook、Carnegie Mellon、Stanford、Clemson、and Wisconsin；Tim Coe、Vitesse Semiconductor；Robert P. Colwell；David Cummings；Bill Dally；David Douglas；José Duato、Universitat Politècnica de València and Simula；Anthony Duben, Southeast Missouri State University；Susan Eggers、University of Washington; Joel Emer；Barry Fagin、Dartmouth；Joel Ferguson、University of California、Santa Cruz；Carl Feynman；David Filo；Josh Fisher、Hewlett-Packard Laboratories；Rob Fowler、DIKU；Mark Franklin、Washington University（セントルイス）；Kourosh Gharachorloo; Nikolas Gloy、Harvard University；David Goldberg、Xerox Palo Alto Research Center；Antonio González、Intel and Universitat Politècnica de Catalunya; James Goodman、University of Wisconsin-Madison；Sudhanva Gurumurthi, University of Virginia；David Harris、Harvey Mudd College；John Heinlein；Mark Heinrich、Stanford；Daniel Helman、University of California、Santa Cruz；Mark D. Hill、University of Wisconsin-Madison；Martin Hopkins、IBM；Jerry Huck, Hewlett-Packard Laboratories；Wen-mei Hwu、University of Illinois at Urbana- Champaign；Mary Jane Irwin、Pennsylvania State University；Truman Joe；Norm Jouppi；David Kaeli、Northeastern University；Roger Kieckhafer、University of Nebraska；Lev G. Kirischian、Ryerson University；Earl Killian；Allan Knies、Purdue University；Don Knuth；Jeff Kuskin、Stanford；James R. Larus、Microsoft Research；Corinna Lee、University of Toronto；Hank Levy；Kai Li、Princeton University; Lori Liebrock、University of Alaska、Fairbanks；Mikko Lipasti、University of Wisconsin-Madison；Gyula A. Mago、University of North Carolina、Chapel Hill；Bryan Martin；Norman Matloff；David Meyer；William Michalson、Worcester Polytechnic Institute；James Mooney；Trevor Mudge、University of Michigan; Ramadass Nagarajan、University of Texas at Austin；David Nagle、Carnegie Mellon University；Todd Narter；Victor Nelson；Vojin Oklobdzija、University of California, Berkeley；Kunle Olukotun、Stanford University；Bob Owens, Pennsylvania State University；Greg Papadapoulous、Sun Microsystems；Joseph Pfeiffer；Keshav Pingali、Cornell University；Timothy M. Pinkston、University of Southern California；Bruno Preiss、University of Waterloo；Steven Przybylski；Jim Quinlan；Andras Radics；Kishore Ramachandran、Georgia Institute of Technology；Joseph Rameh、University of Texas、Austin；Anthony Reeves、Cornell University；Richard Reid、Michigan State University；Steve Reinhardt、University of Michigan；David Rennels、University of California、Los Angeles；Arnold L. Rosenberg、University of Massachusetts、Amherst；Kaushik Roy、Purdue Acknowledgments University；Emilio Salgueiro、Unysis；Karthikeyan Sankaralingam、University of Texas at Austin；Peter Schnorf；Margo Seltzer；Behrooz Shirazi、Southern Methodist University；Daniel Siewiorek、Carnegie Mellon University；J. P. Singh、Princeton; Ashok Singhal；Jim Smith、University of Wisconsin-Madison；Mike Smith、Harvard University；Mark Smotherman、Clemson University；Gurindar Sohi、University of Wisconsin-Madison；Arun Somani、University of Washington； Gene Tagliarin、 Clemson University；Shyamkumar Thoziyoor、University of Notre Dame；Evan Tick、University of Oregon；Akhilesh Tyagi、University of North Carolina、Chapel Hill；Dan Upton、University of Virginia；Mateo Valero、Universidad Politecnica de Cataluña、Barcelona；Anujan Varma、University of California、Santa Cruz；Thorsten von Eicken、Cornell University；Hank Walker、Texas A&M；Roy Want、Xerox Palo Alto Research Center；David Weaver、Sun Microsystems; Shlomo Weiss、Tel Aviv University；David Wells；Mike Westall、Clemson University; Maurice Wilkes；Eric Williams；Thomas Willis、Purdue University；Malcolm Wing；Larry Wittie、SUNY Stony Brook；Ellen Witte Zegura、Georgia Institute of Technology；Sotirios G. Ziavras、New Jersey Institute of Technology。

付 録

ベクタプロセッサの付録は、マサチューセッツ工科大学の Krste Asanović によって修正していただいた。浮動小数点に関する付録は元々は Xerox 社 PARC の David Goldberg 氏が書かれたものである。

演習問題

George Adams、Purdue University；Todd M. Bezenek、University of Wisconsin. Madison （彼の祖母 Ethel Eshom さんの記念に）；Susan Eggers；Anoop Gupta；David Hayes；Mark Hill；Allan Knies；Ethan L. Miller、University of California、Santa Cruz；Parthasarathy Ranganathan、Compaq Western Research Laboratory；Brandon Schwartz、University of Wisconsin.Madison；Michael Scott；Dan Siewiorek；Mike Smith；Mark Smotherman；Evan Tick；Thomas Willis。

ケーススタディと演習問題

Andrea C. Arpaci-Dusseau、University of Wisconsin-Madison；Remzi H. Arpaci-Dusseau、University of Wisconsin-Madison；Robert P. Colwell、R&E Colwell & Assoc., Inc.；Diana Franklin、California Polytechnic State University、San Luis Obispo；Wen-mei W. Hwu、University of Illinois at Urbana-Champaign；Norman P. Jouppi、HP Labs；John W. Sias、University of Illinois at Urbana-Champaign; David A. Wood、University of Wisconsin-Madison。

特別な謝意

Duane Adams、Defense Advanced Research Projects Agency；Tom Adams；Sarita Adve、University of Illinois at Urbana-Champaign；Anant Agarwal；Dave Albonesi、University of Rochester；Mitch Alsup；Howard Alt；Dave Anderson；Peter Ashenden；David Bailey；Bill Bandy、Defense Advanced Research Projects Agency；Luiz Barroso、Compaq's Western Research Lab；Andy Bechtolsheim；C. Gordon Bell；Fred Berkowitz；John Best、IBM；Dileep Bhandarkar；Jeff Bier、BDTI；Mark Birman；David Black；David Boggs；Jim Brady；Forrest Brewer；Aaron Brown、University of California、Berkeley；E. Bugnion、Compaq's Western Research Lab；Alper Buyuktosunoglu、University of Rochester；Mark Callaghan；Jason F. Cantin；Paul Carrick；Chen-Chung Chang；Lei Chen、University of Rochester；Pete Chen；Nhan Chu；Doug Clark、Princeton University；Bob Cmelik；John Crawford；Zarka Cvetanovic；Mike Dahlin、University of Texas、Austin；Merrick Darley；DEC Western Research Laboratory のスタッフ；John DeRosa；Lloyd Dickman；J. Ding；Susan Eggers、University of Washington；Wael El-Essawy、University of Rochester；Patty Enriquez、Mills；Milos Ercegovac；Robert Garner；K. Gharachorloo、Compaq's Western Research Lab；Garth Gibson；Ronald Greenberg；Ben Hao；John Henning、Compaq；Mark Hill、University of Wisconsin-Madison；Danny Hillis；David Hodges；Urs Hölzle、Google；David Hough；Ed Hudson；Chris Hughes、University of Illinois at Urbana-Champaign；Mark Johnson；Lewis Jordan；Norm Jouppi；William Kahan；Randy Katz；Ed Kelly；Richard Kessler；Les Kohn；John Kowaleski、Compaq Computer Corp；Dan Lambright；Gary Lauterbach、Sun Microsystems；Corinna Lee；Ruby Lee；Don Lewine；Chao-Huang Lin；Paul Losleben、Defense Advanced Research Projects Agency；Yung-Hsiang Lu；Bob Lucas、Defense Advanced Research Projects Agency；Ken Lutz；Alan Mainwaring、Intel Berkeley Research Labs；Al Marston；Rich Martin、Rutgers；John Mashey；Luke McDowell；Sebastian Mirolo、Trimedia Corporation；Ravi Murthy；Biswadeep Nag；Lisa Noordergraaf、Sun Microsystems；Bob Parker、Defense Advanced Research Projects Agency；Vern Paxson、Center for Internet Research；Lawrence Prince；Steven Przybylski；Mark Pullen、Defense Advanced Research Projects Agency；Chris Rowen；Margaret Rowland；Greg Semeraro、University of Rochester；Bill Shannon；Behrooz Shirazi；Robert Shomler；Jim Slager；Mark Smotherman、Clemson University；the SMT research group at the University of Washington；Steve Squires、Defense Advanced Research Projects Agency；Ajay Sreekanth；Darren Staples；Charles Stapper；Jorge Stolfi；Peter Stoll；最初の本書制作時に我慢してくれた Stanford と Berkeley の学生；Bob Supnik；Steve Swanson；Paul Taysom；Shreekant Thakkar；Alexander Thomasian、New Jersey Institute of Technology；John Toole、Defense Advanced Research Projects Agency；Kees A. Vissers、Trimedia Corporation；Willa Walker；David Weaver；Ric Wheeler、EMC；Maurice Wilkes；Richard Zimmerman。

John Hennessy ■ David Patterson

目　次

訳者あとがき

2014 年 3 月の『コンピュータアーキテクチャ 定量的アプローチ 第 5 版』の発刊から 3 年 9 か月後、2017 年 12 月に、本書の原著である *Computer Architecture: A Quantitative Approach,* Sixth Edition が世に出た。これまで MIPS アーキテクチャをベースにしていたものから、方針を大転換し、ほとんどの章において **RISC-V** をベースプロセッサにして書き換わり、さらに「Domain-Specific Architectures（領域特化アーキテクチャ）」という新たな章が加わった。そしてなんと、その翌年、原著者の 2 人ヘネシーとパターソンが、コンピュータ科学における最高峰「チューリング賞、2017 年度」を受賞してしまったのだ。さらにはヘネシーは Alphabet 社（Google の親会社）の会長、パターソンは Google の Distinguished Engineer にも就いていた。これは心してかからねばならぬということで、第 5 版の翻訳メンバーの中から、3 人で翻訳チームを組み、この第 6 版の翻訳に取り組むこととなった。この 3 人は以下の部分について分担して翻訳作業に当たった。

- 天野英晴：第 1 章、第 2 章、第 3 章、付録 B、付録 C
- 鈴木　貢：第 4 章、第 7 章
- 中條拓伯：第 5 章、第 6 章、付録 A

チームを 3 人に絞ったのは、そのメンバーで御茶ノ水にあるコーヒーショップでざっと原著を眺めて、章・節構成などを前版と比較した結果、前述の RISC-V への転換と第 7 章のみの追加ということで、差分を取ればそれほど大した作業とはならないだろうと高を括ってしまった。しかしながら、その考えは甘かったことを後に痛感することとなった。

実は、第 5 版の翻訳を終え、編集の段階で手が加わり、校正作業の時に、その編集操作（敢えてこう言わしていただく）において、元の翻訳とは微妙に異なる技術的に誤った記述が散見された。したがって、第 5 版の最終稿の中で、原著と変更のない部分をそのまま転用することは危険であり、技術的・学術的に誤りがないかをチェックしながら進めなければならなかった。さらに加えて、原著においてもデータを新たなものに刷新したこともあったからか、致命的な誤りが信じられないくらい多数見られたのだ。つまり、この翻訳作業は英語から日本語に変換するという作業とともに、疑心暗鬼になりながら、常に疑いの目を光らせて進めていくという作業に終始し、これは極めて精神的に堪える作業となったのである。

現在コンピュータ設計に従事する技術者、この分野を将来背負っていく若い世代に、早く本書を届けたいと思いつつ、学内や学会などにおいて、責任のかかる任務を遂行しつつ、翻訳・校正に取り組む時間を確保するのが困難であったため、翻訳完了が予定より大幅に遅れてしまった。お叱りは覚悟しているが、上記の状況であったことをご理解いただきたい。

第 5 版と同様、技術的な点について原著の誤りを修正しつつ、翻訳ミスをできる限り排除する方向で翻訳、推敲、校正を重ね、ようやく完成に至ったが、まだ細かな誤りはあるかと思う。しかしながら、旬のうちに世に出すべく発刊を急ぐこととした。

本書を手に取る技術者、大学生、大学院生、研究者は、この分野に深い造詣を有している方々だと思われ、些細な誤りについては前後の脈略から判断できる方々であると信じている。

原著は、2 人のチューリング賞受賞者のみによるものではなく、世界中のコンピュータアーキテクチャ研究者、設計者らとともに、最新の大規模高性能計算機を設計・実装・活用している IT 系大企業からの情報をもとにまとめられたものであり、研究論文、技術報告書にも引用されることも少なくないと思われる。したがって、間違った記述には慎重になる必要があり、本書での学術的・技術的な誤りについては、誤植とともに、読者となる方々と今後も情報を共有していくべく、以下の翻訳版情報サイトを準備していただいた。

`http://www.am.ics.keio.ac.jp/wp/caqa6th`

本書に関する誤植情報、最新情報、時に議論などを掲載していく予定なので、ご覧いただくとともに、情報を提供いただけると幸いである。また、このサイト等を通じて、積極的に情報を発信することで、世の中の誤解を正すことができればと願っている。

前版の「訳者あとがき」にも述べられていたが、本書は 2 人の著者の名前から日本では「ヘネパタ」と呼ばれ親しまれてきた。そのヘネパタの初期の頃は、「コンピュータをやさしく解説してくれる名著である」とか、「原文は分かりやすいので、直接当たった方が良い」と囁かれていた。さらに、「第 3 版以降は、コンピュータのカタログに堕してしまっている」といった誤解が世の中にはびこっていた。これらは、この第 6 版においても、やはり全く当てはまらない。ヘネパタは他の工学系の専門書と同様、高度で難解な専門書であり、読んですらすら理解できるような代物ではないことは第 6 版でも同じである。

ヘネパタが名著である所以は、この版においても、膨大で徹底的な定量的評価をまとめた情報量によるとともに、アーキテクチャに関連する分野・技術に関して、その核となる技術とともに、それを支える周辺技術についても、しっかりと網羅されている点にあ

る。また、本書の最初にある謝辞に記載されている査読者、委員会にある名前をご覧いただきたい。ACM、IEEE などの難関な国際会議で招待講演、基調講演を担うような著名な方々の名前にお気づきいただけると思う。それとともに、旧版を含めての査読者の数は驚愕に値する。それでもなお、原著には見過ごされている誤りが多数残されていた。

本書の翻訳を批評したいのであれば、最低限原著と照らし合わせた上で行っていただきたく、世のサイトの匿名の口コミを読んだだけでそれを鵜呑みすることは避けていただきたい。

本書において理解しがたい部分があれば、翻訳のせいであると即断する前に、ぜひ上記の翻訳版情報サイトを訪れていただきたい。そして貴重なご意見をいただき、正誤表に記載するような貢献をいただければ、ご了解のうえ、翻訳版情報サイトとともに、本書の電子版に修正を反映させ、協力者の名前を記載させていただく予定である。

我々は本書の真価を世に問うべく、これからも世の中の誤解を正す使命をもとに時間の許す限り情報を発信し、電子版を進化させていき、恐らくこの第 6 版が最後となるであろう「ヘネパタ」を、誤りの無い、完璧なものになるよう進化させ、完成版を残したい。

中條拓伯

謝　辞

本書の完成にあたり、第 5 版における翻訳部分を流用させていただいた前版以前の翻訳メンバーであった福岡大学佐藤寿倫教授、東京工業大学吉瀬謙二准教授に感謝いたします。また、以下のようにさまざまな方々から助けをいただいた（敬称略）。

天野英晴：

各章を精査していただいた慶應義塾大学理工学部の以下の学生諸君に心から感謝します。

河野隆太、弘中和衛、高野茂幸、小島拓也 、飯塚健介、池添赳治、丹羽直也、戸村遼平、伊藤光平、大和田彩夏、四釜快弥、清水智貴、寺岡朋弘。

中條拓伯：

本書校正に貢献いただいた以下の方々に感謝いたします。

山形大学大学院理工学研究科多田十兵衛助教、同大学工学部東良輔。

東京農工大学工学部中條研究室：識名朝彬、西川 凜、山下遼太、中野道彦、新村研人。

●訳者紹介

中條拓伯（なかじょう ひろのり）
1987年、神戸大学工学研究科電子工学専攻修了、博士（工学）
1989年より神戸大学工学部システム工学科に勤務
1998年よりIllinois大学Center for Supercomputing Research and Development（CSRD）にて、Visiting Research Assistant Professor
1999年、東京農工大学工学部に赴任
現在、東京農工大学大学院共生科学技術研究院准教授
プロセッサアーキテクチャ、FPGAを用いた高性能計算機システムの研究に従事。

天野英晴（あまの ひではる）
1986年、慶應義塾大学工学研究科電気工学専攻修了、工学博士
1985年より慶應義塾大学工学部に勤務
1889年より1990年までStanford大学CSLのVisiting Assistant Professor
現在、慶應義塾大学理工学部情報工学科教授
並列計算機アーキテクチャ、リコンフィギャラブルシステムの研究に従事。

鈴木　貢（すずき みつぐ）
1995年、電気通信大学電気通信学研究科情報工学専攻博士後期課程単位取得満期退学
1995年より電気通信大学電気通信学部に勤務
現在、島根大学総合理工学部知能情報デザイン学科准教授、博士（工学）
特殊命令セット向けコンパイラ最適化と、オープンソース活用向け工学教育に興味を持つ。

●**カバー**：原著カバー（Christian J. Bilbowデザイン）をElsevier社より許可を得て、再利用させていただきました。

ヘネシー■パターソン
コンピュータアーキテクチャ
定量的アプローチ［第6版］

2019年9月25日　初版第1刷発行

著　者　ジョン・L・ヘネシー、デイビッド・A・パターソン
訳　者　中條拓伯、天野英晴、鈴木　貢
発行人　富澤　昇
発行所　株式会社エスアイビー・アクセス（http://www.sibaccess.co.jp）
〒183-0015 東京都府中市清水が丘3-7-15
TEL: 042-334-6780/FAX: 042-352-7191/e-メール: sib-tom@hh.iij4u.or.jp
発売所　株式会社星雲社
〒112-0005 東京都文京区水道1-3-30
TEL: 03-3868-3275／FAX: 03-3868-6588
印刷製本 デジタル・オンデマンド出版センター

This edition of ***Computer Architecture: A Quantitative Approach*, 6e** by **John L. Hennessy, David A. Patterson** (978-0128119051) is published by arrangement with Elsevier Inc.

ISBN 978-4-434-26400-9　Printed in Japan