

CPU の発展とプログラミング言語

アセンブリ言語と C、SIMD 命令、コンパイラについて

2023/02/16, 05/06 山田 泰司 <taiji@aihara.co.jp>

16-bit CPU Intel 8086 とは

アセンブリ言語を半世紀もの昔の Intel 8086 (1978/04) をターゲットに学ぶ理由を、押さえておくと学習の一助となると思う。

Intel 8086 は現在 32-bit CPU で主流である IA-32 命令セット x86 直系の祖先の 16-bit CPU である。時を経て、Intel による 64-bit CPU, Itanium (2001/06) の IA-64 命令セットは主流とはならず、x86 と互換性のある AMD による 64-bit CPU, Opteron (2003/04), Athlon 64 (2004) 等の AMD64 命令セット x86-64 が主流となっている。

遡って、Intel 8086 の祖先は 8-bit CPU の 8080 (1974/04) や 8008 (1972/04) であり、この前任である 4-bit CPU の 4004 (1971) こそが、中央演算装置 CPU (Central Processing Unit) として世界初のマイクロプロセッサとなる。

さて、8-bit CPU としては 1980 年代のパソコンにおいて広く使われた Zilog Z80 (1976/03) が挙げられる。Z80 は組み込み用途で十二分に現役であり、現在でも生産が続けられている。

よって、Z80 をアセンブリ言語のターゲットに据えた方が実用的なのではないかと考えるかも知れないが、そもそも Z80 は Intel 8080 の改良版であり互換品なのである。Intel も改良をした 8085 (1976/03) を経て、8080 アセンブラソース互換を保った 8086 へ至っている。つまり、学習として 8080, Z80, 8085, 8086 のどの CPU をターゲットとしても、本質的には変わらないことは覚えておこう。

著名な 8-bit CPU と使用例

同時期の著名な 8-bit CPU と著名な用途を列举しておこう。

- ・ モトローラ MC6800 (1974) … 日立ベーシックマスター 8-bit PC 他
- ・ MOS テクノロジー 6502 (1975) … Apple II、任天堂ファミコン 8-bit ゲーム機等々
- ・ Zilog Z80 8080 互換 (1976/03) … 数多の 8-bit パソコン

8-bit MC6800 と 8-bit 6502 には互換性はないが、後者が前者をモデルにしたのと、モトローラからスピニアウトとした開発者チームが設立した MOS テクノロジー製であるので、非常に近い存在である。一方で 8-bit 8080 系はルーツが電卓で設計思想が異なるので、この 8-bit MC6800 系と双壁を成す CPU である。

著名な 16-bit CPU と使用例

これらは数年後に 16-bit CPU として発展する。それらの著名な用途を列挙しておく。

- | | |
|---------------------------|--|
| ・ Intel 8086 (1978/04) | … 数多の PC AT の MS-DOS パソコン |
| ・ Zilog Z8000 (1979) | … 数種の Unix 系ワークステーション |
| ・ モトローラ MC68000 (1979/09) | … 数多の Unix 系ワークステーション、Apple Macintosh シリーズ、シャープ X68000 |
| ・ WDC 65816 (1985) | … Apple II GS、任天堂スーパーファミコン 16-bit ゲーム機 |

モトローラ MC68000 は 16/32-bit とも言える当時先駆的な CPU であったため、競合 CPU もすぐさま 32-bit へ追従し、16-bit CPU はそれほど多彩ではない。その事情は、その頃、メモリが急激に安価になったことも関係している。

著名な 32-bit CPU と使用例

これらは数年後に 32-bit CPU として発展することになるが、これらは CISC 系と呼ばれ、他の RISC 系 CPU も多く台頭してくる。それらの著名な用途とともに列挙しておく。

- | | |
|------------------------------|--|
| ・ Zilog Z80000 (1984) | … 数種の Unix 系ワークステーション |
| ・ モトローラ MC68020 (1984) | … 数多の Unix 系ワークステーション、Apple Macintosh シリーズ |
| ・ Intel 80386 (1985/10) | … 数多の PC AT の MS-DOS パソコン、数多の PC Unix |
| ・ エイコーン ARM2 (1985) | … 数多のモバイル機器 |
| ・ MIPS I R2000 (1986) | … 数多の Unix 系ワークステーション |
| ・ モトローラ MC68030 (1987) | … 数多の Unix 系ワークステーション、Apple Macintosh シリーズ、シャープ X68030 |
| ・ Intel i486 (1989/04) | … 数多の PC AT の MS-DOS, Windows 3.1 パソコン、PC Unix |
| ・ モトローラ MC68040 (1990) | … 数多の Unix 系ワークステーション、Apple Macintosh |
| ・ HP PA-RISC 1.1 (1991) | … 数種の Unix 系ワークステーション |
| ・ Sun SuperSPARC I (1992) | … 数種の Unix 系ワークステーション |
| ・ ARM ARM6 (1993) | … 数多のモバイル機器、Apple Newton |
| ・ AIM PowerPC 603/604 (1994) | … 数多の Unix 系ワークステーション、32-bit ゲーム機、Apple Macintosh シリーズ |
| ・ Intel Pentium II (1997) | … 数多の PC AT の MS-DOS, Windows 95 パソコン、PC Unix |
| ・ Intel Pentium III (1999) | … 数多の PC AT の MS-DOS, Windows 2000 パソコン、PC Unix |
| ・ ARM ARMv6 (2008) | … Apple iPhone 初代 |
| ・ ARM ARMv7 Apple A4 (2010) | … Apple iPad 初代、iPhone 4 |

ちなみに、モトローラは AIM 連合 (Apple, IBM, Motorola) として POWER 系に注力している。

著名な 64-bit CPU と使用例

これらは数年後に 32/64-bit CPU として進化することになるが、CISC 系も RISC 系 CPU の利点を取り込みつつ、低消費電力と高クロックの相反する性能向上を引っ提げて登場する。それらの著名な用途とともに列挙しておく。

- ・ Sun UltraSPARC (1995) … 数種の Unix 系ワークステーション
- ・ HAL / Fujitsu SPARC64 (1995) … 京スーパーコンピュータ
- ・ DEC Alpha 21264 (1996) … 数種の Unix 系ワークステーション
- ・ MIPS III (1996) … 任天堂 NINTENDO64 64-bit ゲーム機
- ・ HP PA-RISC 2.0 (1996) … 数種の Unix 系ワークステーション
- ・ MIPS III 64/128-bit (2000) … SCE PS2 Emotion Engine 64/128-bit ゲーム機
- ・ AIM PowerPC 970 … Apple PowerMac G5
- ・ AMD Opteron (2002) … 数多の PC AT の Windows XP パソコン、PC Unix
- ・ AMD Athlon 64 (2003) … 数多の PC AT の Windows XP パソコン、PC Unix
- ・ Intel Pentium 4 Prescott (2004) … 数多の PC AT の Windows XP パソコン、PC Unix
- ・ AIM PowerPC (2005) … MS Xbox 360 / SCE PS3 Cell/B.E. 64-bit ゲーム機
- ・ Intel Core 2 (2006) … 数多の PC AT の Windows Vista パソコン、PC Unix
- ・ RISC-V (2010) … オープンソースの 32/64/128-bit CPU、数多の機器
- ・ Intel Core i (2013) … 数多の PC AT の Windows 7~8 パソコン、PC Unix
- ・ AMD Jaguar x86-64 (2013) … SCE PS4 64-bit / MS Xbox One ゲーム機
- ・ AMD Ryzen 7 Zen (2015) … 数多の PC AT の Windows 10 パソコン、PC Unix
- ・ ARM ARMv8 Apple M1 (2020) … Apple Mac シリーズ

ちなみに、Zilog は 64-bit 化の時流には乗らず、組み込み分野で敢えて 8-bit CPU に原点回帰して成功を収めている。HP PA-RISC は Intel Itanium 64-bit CPU へ移行を計画するが Intel 主導の Itanium の失敗により共々消滅、MIPS Technology は RISC-V へ移行、DEC (現 HP) による Alpha 系の技術は ARM 系に応用され、最終的には Intel に売却された。

結局、現在で主流を維持しているのは Intel と AMD による x86/x86-64 と ARM/ARM64、そしてオープンソースの RISC-V だけとなる。Sun Microsystems (現 Oracle) による SPARC 系は一部のハイエンドサーバ向け、AIM の一角 IBM の POWER 系も同様となる。

上記には載せていないが、現ルネサスエレクトロニクス (日立、三菱、東芝、等) にも特に組み込み用途向けに日本産の SuperH などの日立時代の技術資産を ARM 系や RISC-V 系に活かした製造を続けている。

結論 — 8086 アセンブリ言語を学ぶ理由

アセンブリ言語は CPU の命令セットに強固に依存するものの、記述のスタイルは 16-bit 時代には完成され、それぞれの CPU の特性を活かす場となった。

同時に、プログラミング言語 C などのコンパイラ技術が発展し、アセンブリ言語の用途は CPU 固有の、例えば SIMD 命令などを C コード内部から条件付きコンパイルで、各 CPU 固有の最新機能を駆使していく場となっていく。

しかしそれも、OpenCL などの貢献によりアセンブリ言語はライブラリ内に隠され、様々な CPU で SIMD 命令、さらには GPGPU (General Purpose GPU) の機能も活かすように大抵のプラットフォームでは一般的となった。

一方で、32/64-bit が扱えるメモリ空間はリニアに広大だが、OS が管理しているメモリのヒープ領域に依存せざるを得なくなり、教育上は、アセンブリ言語だけでそれを達成するには少々複雑過ぎ、コンピュータアーキテクチャだけでなく OS 設計論まで知見が及んでしまうだろう。

よって、レガシーではあるが、アセンブリ言語として完成された 16-bit 時代を代表し、かつ、現代も支える Intel 8086 を学ぶことは、まったく以って妥当である。

CPU とプログラミング言語

執筆時点での人気プログラミング言語はモダンな C# や Python だが、人気のある言語と重要な言語とは全く異なる（単価が安くても需要がある言語と、単価は高いが素養を要する言語だ）。

まず、CPU などマシンに密接した性能を引き出そうとすれば、Python 等スクリプト言語においてライブラリが未対応であるなら、C/C++ やアセンブリ言語を扱わざるを得ないのである。また、昨今の LLVM/Clang コンパイラの進歩によってアセンブリ言語を必要とする場面は極めて少ないが、それでもコンパイラが未対応で CPU 固有の独自の命令で性能を引き出そうとすれば C/C++ からアセンブリ言語を記述せざるを得ないのである。

一方で C# は共通言語基盤 CLI (Common Language Infrastructure) に基づくので、CPU 固有の命令を直接叩くのはあまり勧められた方法ではない。折角の CLI によるポータビリティを損なってよいのか再検討する必要があるだろう。

よって、多少難しいがシステムに対して自由度の高い C/C++ 及びアセンブリ言語、PC ではポータビリティの高い C#、マルチプラットフォームでポータビリティの高い Python 等のスクリプト言語は、それぞれ用途が異なるいずれも重要なプログラミング言語なのである。そもそも、プログラミング言語は適用場面や時代々々で適切な言語を選択すべきで、極論としては、どんなプログラミング言語も重要である。

参考 — MIX/MMIX 仮想マシンと開発環境の紹介

TeX の作者で数学者・計算機科学者であるドナルド・クヌースの大著「The Art of Computer Programming (TAoCP)」には教育用途に設計した仮想 CPU の命令セット「MIX (1968)」がある。同氏はさらに MIX を現代的に置き換えるべく、なんと MIPS (1986) 設定者であるジョン・ヘネシーと DEC Alpha (1996) 設計者であるディック・サイツと同氏の最強の布陣で設計した「MMIX (1999)」がある。これをアセンブリ言語のターゲットとすることは一考に値するだろう。

しかし、やはり現実存在する CPU ではないことから躊躇せざるを得ないが、以下にこれらの開発環境が揃っているので、大いに参考にされたい。

1. Jose Antonio Ortega Ruiz, “GNU MIX Development Kit (MDK), “ <https://www.gnu.org/software/mdk/>, 2001.
2. Martin Ruckert and Martin Leitner, “MMIX Home Page, “ <https://mmix.cs.hm.edu/>, Munich University of Applied Sciences, 2011.

MIX は一般的な 2 進法に加えて、今や稀な 10 進法の演算を備える 31-bit CPU であり、ローマ数字で 1009 がモデル名であり、MMIX は RISC ベースの本格的な 64-bit CPU であり、ローマ数字で 2009 がモデル名である。

補遺 — SIMD 命令の発展

SIMD 命令に言及したので、その発展を主要な CPU についてまとめておく。SPARC と MIPS の貢献と、その後の Apple, Intel, AMD の追従、富士通の技術力が目に留まる。

発売年	レジスタ幅	SIMD	ベンダー	CPU モデル	バス幅
1995	64-bit	VIS 1	Sun Microsystems	UltraSPARC	64-bit
1996	64-bit	MDMX	MIPS Technologies	MIPS V	64-bit
1997	64-bit	MMX	Intel	Pentium P5	32-bit
1999	128-bit	SSE	Intel	Pentium III	32-bit
1999	128-bit	VIS 2	Sun Microsystems	UltraSPARC III	64-bit
2001	128-bit	Altivec/VMX	AIM	PowerPC 7400	64-bit
2002	128-bit	VMX	AIM	PowerPC 970	64-bit
2005	128-bit	SSE3	Intel	Pentium 4 Prescott-2M	64-bit
2005	128-bit	VMX-128	AIM	PowerPC 970 Xenon	64-bit
2010	128-bit	NEON	Apple	A4 (ARMv7)	32-bit
2011	256-bit	VIS 3	Sun Microsystems	SPARC T4	64-bit
2011	256-bit	AVX	Intel	Core i Sandy Bridge	64-bit
2012	512-bit	AVX-512	Intel	Xeon Phi	64-bit
2019	512-bit	SVE	Fujitsu	A64FX (ARMv8)	64-bit
2021	512-bit	AVX-512	Intel	Core i Rocket Lake	64-bit

このように、スーパーコンピュータ、ハイエンドサーバの技術（その中にはゲーミングやスマートフォンも含まれつつある）が数年でコンシューマに一般化されつつあることが実感できる。

補遺 — プロセスルールの発展

さて、CPU の高性能化、つまりトランジスタ数の増大、及び、消費電力を抑える技術は、実際のところプロセスルールの微細化によってその生産が支えられていることが重要である。

プロセスルールの進化を上述の CPU の進化とともにまとめておこう。プロセスルールの微細化には多額な設備投資が必要であることが伺えよう。

ちなみに、出荷日は日さらには月までは正確に把握できなかったものは一日、一月一日のように仮の日付をデータとしていることは了解頂きたい（次図に関しても同様）。

図 1 は著名な CPU のプロセスルール (nm) を出荷日に対してプロットしたものであり、縦軸は対数としている。見事に 50 年で 3 桁の微細化を達成している。

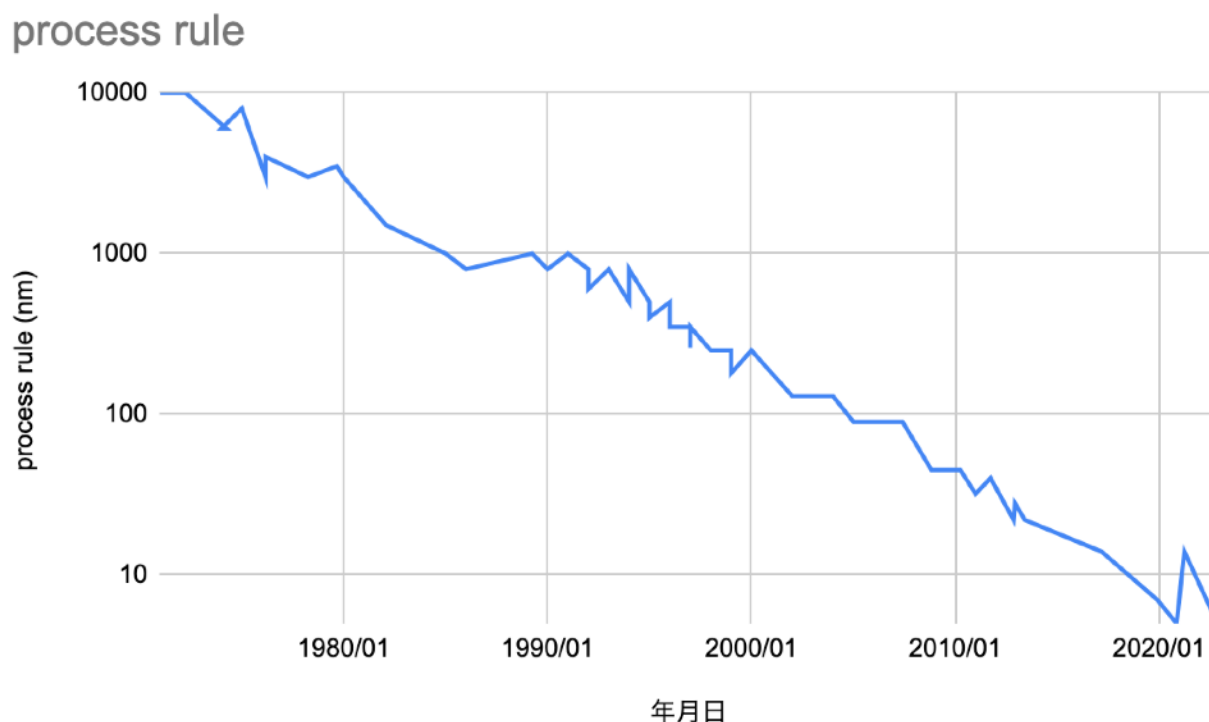


図 1 約 50 年間の CPU プロセスルールの変遷

時代の節目となる著名な以下の CPU を上図グラフの元データとしているので参考まで。

稼働年	ベンダー	model	process rule (nm)
1971/01	Intel, Busicom	4004 4-bit CPU	10000
1972/04	Intel	8008 8-bit CPU	10000
1974/04	Intel	8080 8-bit CPU	6000
1974/01	Motorola	MC6800 8-bit CPU	6000
1975/01	MOS Technology	6502 8-bit CPU	8000
1976/03	Intel	8085 8-bit CPU	3000
1976/03	Zilog	Z80 8-bit CPU	4000
1978/04	Intel	8086 16-bit CPU	3000
1979/09	Motorola	MC68000 16/32-bit CPU	3500
1980/01	Intel	8087 16-bit FPU	3000
1982/02	Intel	80286 16-bit CPU	1500

1985/01	Intel	80386 32-bit CPU	1000
1986/01	MIPS Technologies	R2000 (MIPS I) 32-bit CPU	800
1989/04	Intel	i486 32-bit CPU	1000
1990/01	Motorola	MC68040 32-bit CPU	800
1991/01	Hewlett-Packard	PA-RISC 1.1 32-bit CPU	1000
1992/01	MIPS Technologies	R4000 (MIPS III) 64-bit CPU	800
1992/01	Sun Microsystems	Super/microSPARC I 32-bit CPU	800
1992/01	Apple, IBM, Motorola	PowerPC 601 32-bit CPU	600
1993/01	Intel	Pentium 32-bit CPU	800
1994/01	Sun Microsystems	microSPARC II 32-bit CPU	500
1994/01	Apple, IBM, Motorola	PowerPC 603 32-bit CPU	500
1994/01	Apple, IBM, Motorola	PowerPC 604 32-bit CPU	500
1994/01	Motorola	MC68060 32-bit CPU	600
1994/01	Hitachi	SH-2 32-bit CPU	800
1995/01	Sun Microsystems	UltraSPARC 64-bit CPU	500
1995/01	HAL, Fujitsu	SPARC64 64-bit CPU	400
1996/01	Hewlett-Packard	PA-RISC 2.0 64-bit CPU	500
1996/01	DEC	Alpha 21264 64-bit CPU	350
1997/01	Intel	Pentium II 32-bit CPU	350
1997/01	Apple, IBM, Motorola	PowerPC 75x 32-bit CPU	260
1997/01	Sun Microsystems	UltraSPARC II 64-bit CPU	350
1997/01	Intel	Pentium P6 32-bit CPU	350
1998/01	Hitachi	SH-4 32-bit CPU	250
1999/01	Intel	Pentium III 32-bit CPU	250
1999/01	Apple, IBM, Motorola	PowerPC 745x 32-bit CPU	200
1999/01	Sun Microsystems	UltraSPARC III 64-bit CPU	180
2000/01	SCE, Toshiba	R5900 (MIPS III) 128-bit CPU for PS2	250
2001/01	Apple, IBM, Motorola	PowerPC 7450 32-bit CPU	180
2002/01	Apple, IBM, Motorola	PowerPC 970 64-bit CPU	130
2003/04	AMD	Opteron 64-bit CPU	130
2004/01	AMD	Athlon 64 64-bit CPU	130
2005/02	Intel	Pentium 4 Prescott-2M 64-bit CPU	90
2005/01	Apple, IBM, Motorola	PowerPC 970 64-bit CPU for Xbox 360	90
2006/01	Apple, IBM, Motorola	PowerPC 970 64-bit CPU for PS3	90
2007/06	Apple, ARM	ARM11 (ARMv6) 32-bit CPU for iPhone	90
2008/11	Intel	Core i7 64-bit CPU	45
2010/04	Apple	A4 (ARMv7) 32-bit CPU	45
2011/09	Sun Microsystems	SPARC T4 64-bit CPU	40
2011/01	Intel	Core i Sandy Bridge Series 64-bit CPU	32
2012/11	Intel	Xeon Phi	22
2012/12	Sun Microsystems	SPARC M5 64-bit CPU	28
2013/06	Intel	Core i Haswell Series 64-bit CPU	22
2017/03	AMD	Ryzen 7 (Zen) 64-bit CPU	14

2019/12	Fujitsu	A64FX (ARMv8.2-A)	7
2020/11	Apple	M1 (ARMv8) 64-bit CPU	5
2021/03	Intel	Core i Rocket Lake Series 64-bit CPU	14
2022/11	Apple	M2 (ARMv8) 64-bit CPU	5

補遺 — トランジスタ数の発展

プロセッサユニットがプロセスルールの微細化に支えられれば、ダイ上に多くのトランジスタを詰め込むことができるようになり、より高性能化が可能になる。

下図は著名な CPU のトランジスタ数を出荷日に対してプロットしたものであり、縦軸は対数としている。見事に 50 年で 6 桁のトランジスタ数の増加を達成している。

transistors

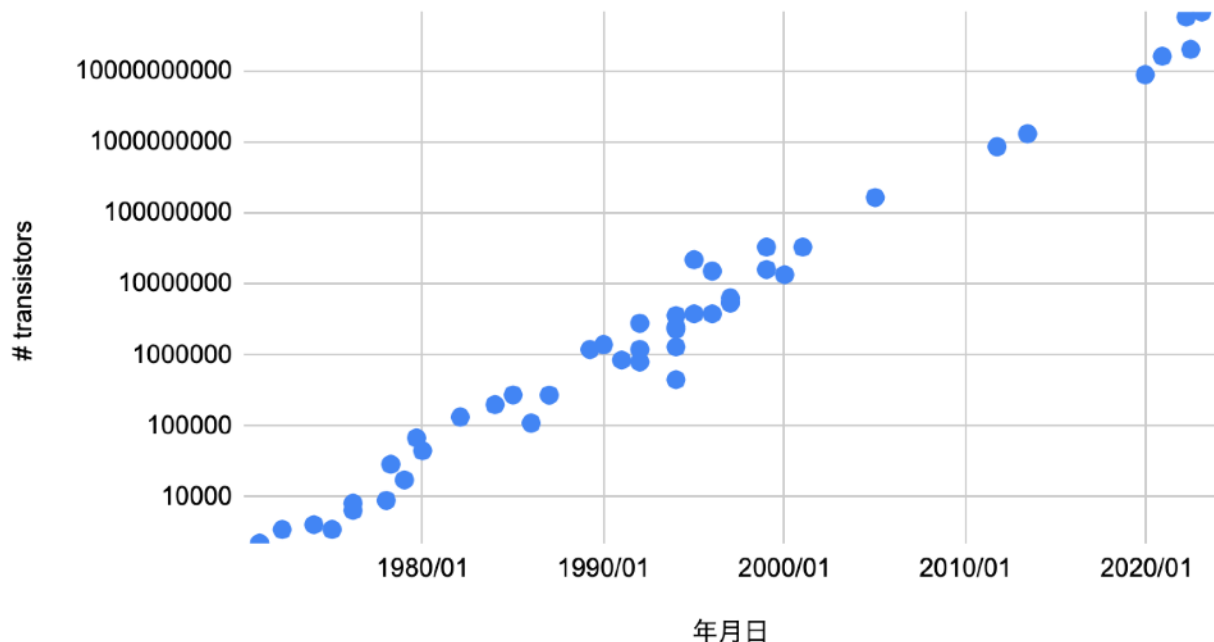


図 2 約 50 年間の CPU トランジスタ数の変遷

時代の節目となる著名な以下の CPU を上図グラフの元データとしているので参考まで。

稼働年	ベンダー	model	# transistors
1971/01	Intel, Busicom	4004 4-bit CPU	2250
1972/04	Intel	8008 8-bit CPU	3500
1974/01	Motorola	MC6800 8-bit CPU	4100
1975/01	MOS Technology	6502 8-bit CPU	3510
1976/03	Intel	8085 8-bit CPU	6500
1976/03	Zilog	Z80 8-bit CPU	8200
1978/04	Intel	8086 16-bit CPU	29k
1978/01	Motorola	MC6809 8-bit CPU	9k

1979/01	Zilog	Z8000 16-bit CPU	17.5k
1979/09	Motorola	MC68000 16/32-bit CPU	68k
1980/01	Intel	8087 16-bit FPU	45k
1982/02	Intel	80286 16-bit CPU	134k
1984/01	Motorola	MC68020 32-bit CPU	200k
1985/01	Intel	80386 32-bit CPU	275k
1986/01	MIPS Technologies	R2000 (MIPS I) 32-bit CPU	110k
1987/01	Motorola	MC68030 32-bit CPU	273k
1989/04	Intel	i486 32-bit CPU	1200k
1990/01	Motorola	MC68040 32-bit CPU	1400k
1991/01	HP (Hewlett-Packard)	PA-RISC 1.1 32-bit CPU	850k
1992/01	MIPS Technologies	R4000 (MIPS III) 64-bit CPU	1200k
1992/01	Sun Microsystems	Super/microSPARC I 32-bit CPU	800k
1992/01	Apple, IBM, Motorola	PowerPC 601 32-bit CPU	2800k
1994/01	Sun Microsystems	microSPARC II 32-bit CPU	2300k
1994/01	Apple, IBM, Motorola	PowerPC 603 32-bit CPU	1300k
1994/01	Apple, IBM, Motorola	PowerPC 604 32-bit CPU	3600k
1994/01	Motorola	MC68060 32-bit CPU	2500k
1994/01	Hitachi	SH-2 32-bit CPU	450k
1995/01	Sun Microsystems	UltraSPARC 64-bit CPU	3800k
1995/01	HAL, Fujitsu	SPARC64 64-bit CPU	21900k
1996/01	HP (Hewlett-Packard)	PA-RISC 2.0 64-bit CPU	3800k
1996/01	DEC	Alpha 21264 64-bit CPU	15200k
1997/01	Apple, IBM, Motorola	PowerPC 75x 32-bit CPU	6350k
1997/01	Sun Microsystems	UltraSPARC II 64-bit CPU	5400k
1997/01	Intel	Pentium P6 32-bit CPU	5500k
1999/01	Apple, IBM, Motorola	PowerPC 745x 32-bit CPU	33M
1999/01	Sun Microsystems	UltraSPARC III 64-bit CPU	16M
2000/01	SCE, Toshiba	R5900 (MIPS III) 128-bit CPU for PS2	13.5M
2001/01	Apple, IBM, Motorola	PowerPC 7450 32-bit CPU	33M
2005/01	Apple, IBM, Motorola	PowerPC 970 64-bit CPU for Xbox 360	165M
2011/09	Sun Microsystems	SPARC T4 64-bit CPU	855M
2013/06	Intel	Core i Haswell Series 64-bit CPU	1300M
2019/12	Fujitsu	A64FX (ARMv8.2-A)	8.8G
2020/11	Apple	M1 (ARMv8.6-A) 64-bit CPU	16G
2022/03	Apple	M1 Max (ARMv8.6-A) 64-bit CPU	57G
2022/06	Apple	M2 (ARMv8.6-A) 64-bit CPU	20G
2023/01	Apple	M2 Max (ARMv8.6-A) 64-bit CPU	67G

改めて驚かされるが、M2 Max はスパコン「富嶽」CPU A64FX の 7 倍ものトランジスタ数を有している。記載はしていないが M1 Ultra は 114G トランジスタ数なので 10 倍以上である。

謝辞

本稿について、私の研究室時代からの戦友である實来俊介氏のご助言を頂いた。

参考文献

一次情報源は大量になってしまうので、多次情報源のうち優れた文献をここに載せておく。

1. 柴田 文彦, 「6502 と Apple II システム ROM の秘密 — 6502 機械語プログラミングの愉しみ」 Rutles, 2020.
 - … 第4章で CPU 6502 の全命令セットを詳説。
 - … 第5章で Apple II のアーキテクチャを詳説。
 - … 第6章で Apple II のファームウェアを詳説。
2. 柴田 文彦, 「68000 と Macintosh Toolbox 詳解 — アセンブリ言語プログラミングの奥義」 Rutles, 2022.
 - … 第3章で CPU 68000 の全命令セットを詳説。
 - … 第5章で Apple Macintosh のアーキテクチャを解説。
 - … 第6章で Apple Macintosh のシステムソフトウェアを詳説。
 - … 第7章でアセンブラによる GUI アプリケーションの製作例を紹介。
3. 鈴木 哲弥, 「Intel 8080 伝説」 Rutles, 2017.
4. 鈴木 哲弥, 「モトローラ 6800 伝説」 Rutles, 2017.
5. 鈴木 哲弥, 「ザイログ Z80 伝説」 Rutles, 2020.
 - … CPU 8085, 6800, Z80 の詳解だけでなく、電子工作で実際に動作させるまでを詳説。
6. 川俣晶, 「国産初のパソコン・はじめてパーソナルコンピューターを自称した国産機は何か・それはPC8001ではない」, ピーデー, 2019.
7. 川俣晶, 「1970年代パソコンとBASICの歴史・Altair8800やTK80は始祖ではなかった」, ピーデー, 2019.
 - … パソコンの日本史と世界史に関する雑文。元マイクロソフト社員による Unix 系 OS や OSS へのルサンチマンが散見されて興味深い。1970 年あたりの DEC によるミニコンまで辿り着いている辺りは必読の価値あり。
8. 情報処理学会, 「コンピュータ博物館」, <https://museum.ipjs.or.jp/>, 2003.