

# 1970～1980 年代におけるマイクロプロセッサー および PC の技術的展開

佐野正博

(1) Intel の 8 ビット・マイクロプロセッサーと 16 ビット・マイクロプロセッサーにおける 継承性.....	1
a. マイクロプロセッサーの 16 ビット化におけるソフトウェア資産継承への配慮 --- 技術的連続性 重視戦略に基づく 8086 vs 性能向上重視戦略に基づく 68000.....	1
b. x86 アーキテクチャにおける物理メモリのアドレス指定法・・・セグメントとオフセットによる 2 段階での指定作業.....	6
c. 互換性維持重視戦略に基づくインテル x86 アーキテクチャの技術的進化 .....	8
(2) 1970～1980 年代におけるインテルのマイクロプロセッサー .....	10
(3) 1970 年代後半期および 1980 年代における PC 市場 .....	13
参考文献 .....	16

## (1) Intel の 8 ビット・マイクロプロセッサと 16 ビット・マイクロプロセッサにおける継承性

### a. マイクロプロセッサの 16 ビット化におけるソフトウェア資産継承への配慮 --- 技術的連続性重視戦略に基づく 8086 vs 性能向上重視戦略に基づく 68000

Intel の 8080、8085 およびザイログの Z80 など Intel8080 系マイクロプロセッサは、モトローラの 6800 系マイクロプロセッサと並んで 8 ビット PC 市場における主要なマイクロプロセッサであった。

例えば、キット型パソコンの時代のホビイストの代表的なクラブである Homebrew Computer Club の会員を対象として、1975 年 10 月 15 日、1976 年 1 月 7 日、1976 年 6 月 9 日に行われた非公式投票(straw votes)に基づく調査結果(表 1)によると、利用しているマシンのマイクロプロセッサで最も利用されているのは Intel 8080 である。6800,650x という Motorola 6800 系の 8 ビットマイクロプロセッサの数は、4(11%)、16(23%)、30(30%)というように調査の回を追うごとに着実に割合を増やしているが、8008,8080,Z80 という Intel 8080 系の 8 ビットマイクロプロセッサの数は、30(79%)、44(63%)、63(62%)というように、倍以上の利用率となっている。

また 1978 年後半にロサンゼルスで開催された二つのコンピュータ・ショウの来場者を対象として南カリフォルニア大学のパソコン・アセスメント調査チームがおこなった調査の結果は、表 2 にまとめた通りであるが、Intel の 8080 系 CPU を利用した PC が 29%、Zilog の Z80 系 CPU を利用した PC が 29%、MOS Technology の 6502 を利用した PC が 19%となっている。この調査においても、Intel 8080 系の 8 ビットマイクロプロセッサを利用した PC が 54%と過半数を占めており、Motorola 6800 系の 8 ビットマイクロプロセッサを利用した PC の 19%の約 3 倍の

表1 Homebrew Computer Clubにおけるマイクロプロセッサ利用調査結果

マイクロプロセッサ	1975/ 10/15	1976/ 1/7	1976/ 6/9
Intel 4004		1	1
Intel 8008	5	7	8
Intel 8080	25	37	53
Zilog Z-80			2
Motorola 6800	2	9	12
MOS Technology 650x	2	7	18
DEC PDP-8			4
DEC PDP-11/20			1
DEC LSI-11			3
その他	4	9	1
合計	38	78	103

[出典]Warren(1977) p.14<sup>(1)</sup>

表2 1978 年後半のロサンゼルスコンピュータ・ショウでの来場者を対象とした利用 PC 調査

利用 CPU	会社名	製品名	台数	%
8080	MITS	Altair 8800	17	5%
	IMSAI	IMSAI 8080	45	12%
	Processor Technology	SOL TERMINAL	14	4%
	その他の 8080 利用 PC		30	8%
Z80	North Star Computers	HORIZON H-1	8	2%
	Exidy Sorcerer	DP1000	6	2%
	Radio Shack	TRS 80	45	12%
	その他の Z80 利用 PC		33	9%
6502	Apple	APPLE II	42	11%
	Commodore	PET 2001	29	8%
16-Bit Machines			20	5%
その他			77	21%

[出典] Holmen(1980)p.481。企業名や製品名などの一部に関して、補充をおこなっている。回答者総数は 267 名、その内で、すでに PC を所有していた者が 231 名で、所有 PC の総台数は 366 台であった。また、PC をまもなく購入予定の者が 26 名であった。

あるが、Intel の 8080 系 CPU を利用した PC が 29%、Zilog の Z80 系 CPU を利用した PC が 29%、MOS Technology の 6502 を利用した PC が 19%となっている。この調査においても、Intel 8080 系の 8 ビットマイクロプロセッサを利用した PC が 54%と過半数を占めており、Motorola 6800 系の 8 ビットマイクロプロセッサを利用した PC の 19%の約 3 倍の

利用度になっている。

Intel は、8 ビット・マイクロプロセッサ市場におけるこうした相対的優位を生かすために、新世代の 16 ビット・マイクロプロセッサ 8086 の開発に当たって、旧世代の Intel 8080 系マイクロプロセッサ用に書かれたソフトウェア資産の継承を重視した設計をおこなった。

たとえば 8086 は、8080/8085 とオブジェクト・コードのレベルにおける互換性までは確保されていないが、アセンブリ言語のレベルでは 1 対 1 に対応する命令セットを採用し、8080/8085 や Z80 など Intel 8080 系の 8 ビットマイクロプロセッサ向けにソフトウェアを開発しているプログラマーのソフトウェア開発力、および、Intel 8080 系マイクロプロセッサ向けに書かれた過去のソフトウェア資産の活用を可能にした。

Intel は、そのように製品イノベーションの前後で旧世代製品と新世代製品との間に高い互換性を確保することで、新世代製品のスタートアップ問題の解決を図り、互換性維持を軽視した製品開発戦略を採用した Motorola や Zilog などに対してソフトウェアに関する相対的競争優位を確立した。

Intel は 16 ビット・マイクロプロセッサの開発にあたって、こうした 8 ビット・マイクロプロセッサ時代の過去のソフトウェア資産を生かすという方向でマイクロプロセッサ開発をおこなった。Zilog や Motorola が 16 ビット・マイクロプロセッサの開発に際して自社の 8 ビット・マイクロプロセッサとの連続性を最優先しなかったのとは対照的に、Intel はソフトウェア資産の継承性を重視し、一定の連続性を保つようにしたのである。

また、Intel の 8080/8085 だけでなく、Zilog の Z80 や Motorola の 6800 など、8 ビット・マイクロプロセッサの多くはアドレス指定を 16 ビットでおこなっており、メモリのアドレス空間はいずれも  $2^{16}=64\text{KB}$  であったが、Intel はメモリのアドレス空間の構造に関して、新世代製品において旧世代製品との互換性維持を優先した。

すなわち、8086 では 20 ビットまでアドレス幅が拡張されたので本来は  $2^{20}=1024\text{K}$  バイト = 1 M バイトまでのメモリ空間へのリニアなアドレッシングが可能であるにも関わらず、リニアにアクセスできるメモリ空間は 64KB に制限されたのである。64KB を超えるメモリ空間へのアクセスにはセグメント切り替えと呼ばれる操作が必要になり、プログラミングが複雑になるだけでなく、プログラムの実行速度もその分だけ遅くなっている。

このように 8086 は、それ以前の 8 ビット・マイクロプロセッサとの連続性を重視した結果として、新しい 16 ビット・マイクロプロセッサとしては不自然な制約をいくつか抱え込むことになった。

8086 は 8 ビット・マイクロプロセッサとの連続性維持を優先した結果として、そのアーキテクチャが「汚い」とか「洗練されていない」とか言われることがある。これに対して、Motorola の 68000 は、8 ビット・マイクロプロセッサとの連続性維持よりも性能向上を優先した設計により、そのアーキテクチャは「美しい」と言われている。実際、68000 は、32 本の 32bit レジスタを備えた内部バスが 32bit、外部バスが 16bit という構成の 16 ビット・マイクロプロセッサであり、物理メモリも  $2^{24}=16\text{MB}$  までリニアにアドレスできた。

しかしそれにも関わらず、販売量という点では Motorola は Intel に比べてまったく及ばなかった。(マイクロプロセッサにおける継承性を重視しないという Motorola の技術戦

略は、6809 という 6800 系の 8 ビット・マイクロプロセッサの開発においても同様であった。6809 は「究極の 8 ビット・マイクロプロセッサ」と一部で呼ばれるほど優れたアーキテクチャを持っていたが、それ以前の 6800 系 8 ビット・マイクロプロセッサと互換性を持っておらず、それ以前の 6800 系マイクロプロセッサで動作していたプログラムが動作しなかった。Motorola は、Intel と異なり、それ以前のソフトウェア資産を重視しなかったのである。

この点に関しては、Zilog 社も 16 ビット・マイクロプロセッサの開発に当たり同様の技術戦略を取り、Intel の 8080 互換の 8 ビット・マイクロプロセッサとして大ヒットした Z80 の後継である 16 ビット・マイクロプロセッサの開発に当たり、Z80 との互換性を持たない Z8000 というマイクロプロセッサを開発した。

Zilog は 1976 年 7 月から 16 ビット・マイクロプロセッサの開発に取りかかったが、当然のことながらその際に「Z80 との互換性を保つのかどうか？」という互換性維持に関わる技術的選択が開発会議における最大の議題となった。Zilog の CEO のファジン(Federico Faggin)は旧世代マイクロプロセッサZ80 と互換性を持たせた形で新世代製品を開発する互換性維持重視戦略に立つ議論を展開したが、ファジンのそうした主張は結局のところ採用されなかった。性能向上重視戦略に立つ議論が勝利を収め、Z80 と比較して斬新なアイデアを盛り込んだ高機能で高性能なマイクロプロセッサを開発することになったのである。

こうした技術的決断に関して嶋正利は、「大型コンピュータのアーキテクチャ技術者がマイクロプロセッサ開発に投入されたことによるところが非常に大きかった」（前掲書,p.154）と述べているが、そのことによる製品開発思想の転換が製品開発期間の相対的長期化や PC 機のバリュー・ネットワークとのズレをもたらし、新世代マイクロプロセッサZ8000 の普及に対してマイナスの影響を及ぼし、「性能が良いにも関わらず、売れない」というジレンマを抱えることになった。

マイクロプロセッサ製品が属するバリュー・ネットワークとは異なるバリュー・ネットワークに属する技術集団が製品開発の技術的方向性の決定に関して主導権を握ったため、前世代マイクロプロセッサ製品との互換性を維持することによるスタートアップ期におけるバンドワゴン効果活用の意義が軽視されることになったのである。

図1 互換性維持重視戦略に基づくIntelのマイクロプロセッサ開発

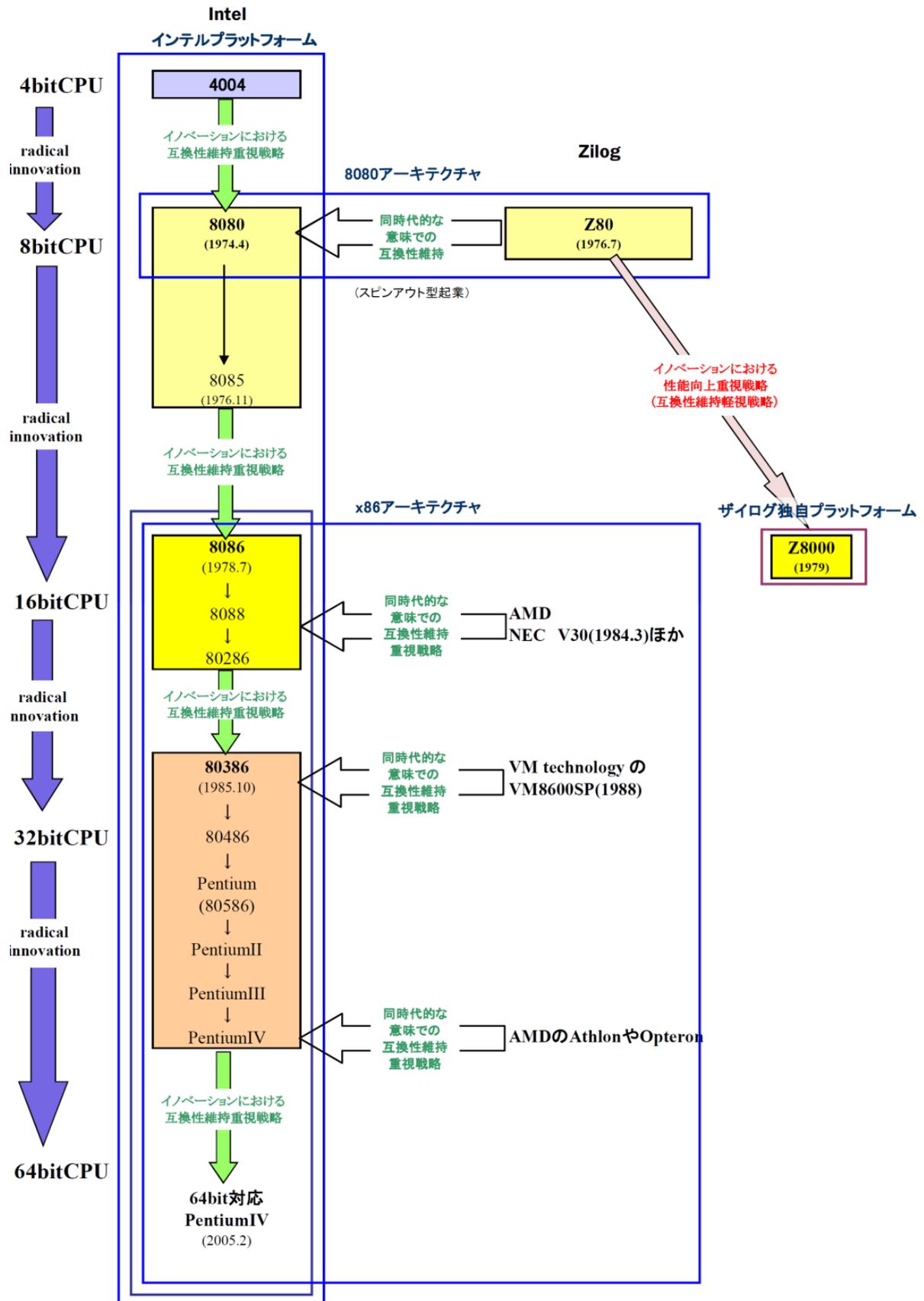
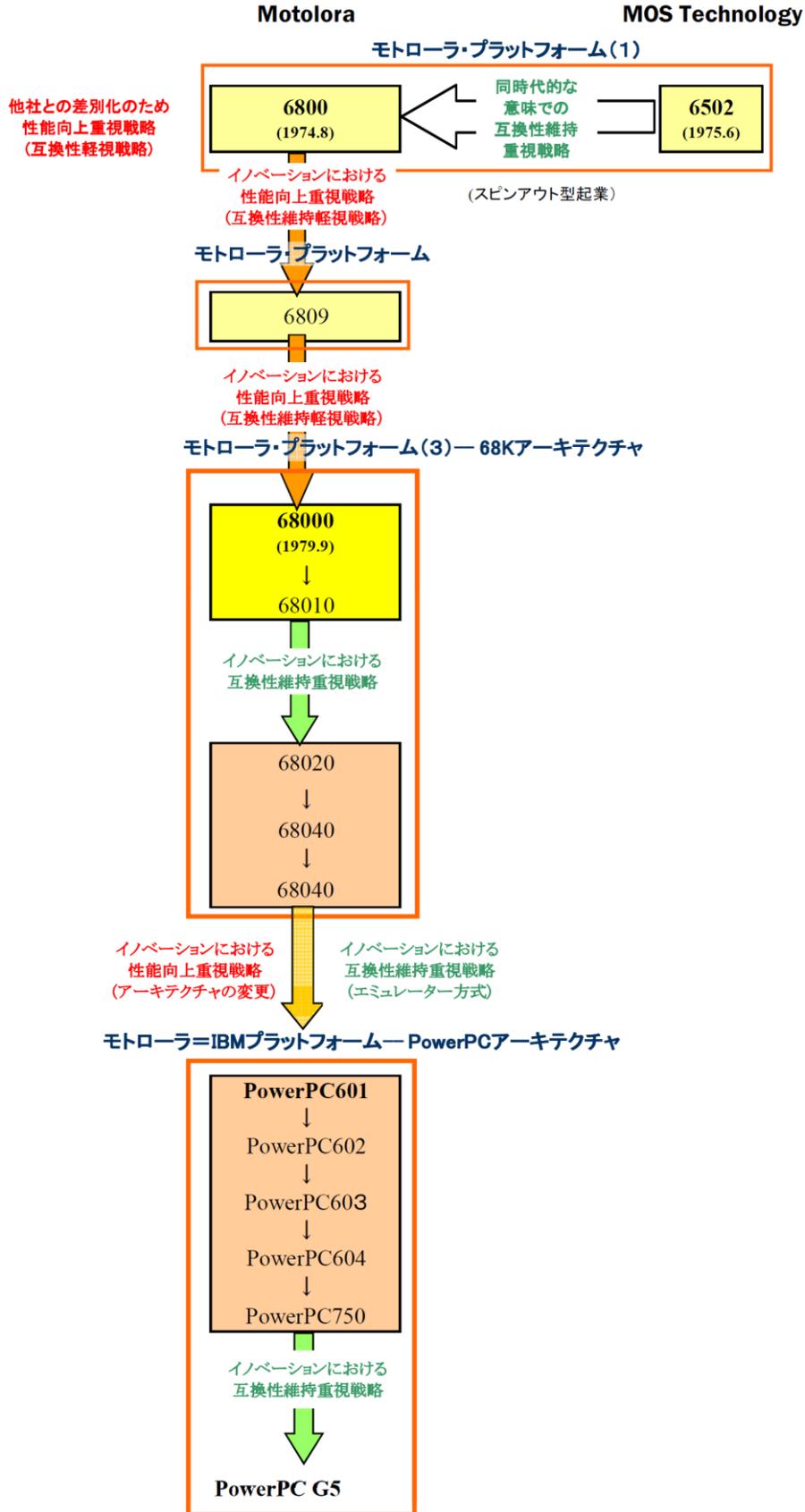


図2 性能向上重視戦略に基づくMotorolaのマイクロプロセッサ開発



## b. x86 アーキテクチャにおける物理メモリのアドレス指定法・・・セグメントとオフセットによる2段階での指定作業

### 8086 におけるアドレス指定法

8086 プロセッサは、アドレス・バスの幅は 20bit であるが、16 ビット・マイクロプロセッサであるため汎用レジスタの幅は 16bit である。そのため、 $2^{16}=65,536\text{bytes}=64\text{KB}$  以上のアドレス空間を 1 個の汎用レジスタのみで直接的に指定することはできない。そこで二つの汎用レジスタを用い、それぞれのレジスタにセグメント値とオフセット値という二つの情報（ともに情報量としては 16bit である）を割り当てることで、より広大なメモリ空間に対するアドレス指定ができるように設計されている。すなわち、メモリ空間の中のある特定の位置を指示するのに、「セグメント」と「オフセット」という 2 つの指示情報を利用した。

メモリ空間中の位置（アドレス）の指定は下記のように 2 段階作業で行われることになる。

#### アドレス指定の第 1 段階

まずセグメント値によって、メモリ空間上におけるセグメント・ベース・アドレス（セグメント領域の開始アドレス、すなわち、セグメント領域がメモリ空間上のどこから始まるのかを示すアドレス）を指定する。すなわち、下図で言えば、メモリ空間中の何番目の「目盛り」が基点になるかを指定する。

#### アドレス指定の第 2 段階

次に、オフセット値によってセグメント・ベース・アドレスからどれだけ離れた位置であるかを指定する。すなわち、下図で言えば、セグメント値によって指定された基点の「目盛り」からどれだけ離れた位置にアドレスがあるかを指定する。

このように 2 段階で、目的のアドレスが指定されることになる。すなわち図 3 で言えば、オフセット値の矢印の先の●印の位置が目的のアドレスとして指定されることになる。

こうした 2 段階の指定作業は、場所の指定を目印となる建物から何メートル先にあるというように指定するのと同様である。セグメント値によって「目印となる建物」の場所の情報を、オフセット値がその場所から何メートル先であるのかという情報を与えている、と考えればわかりやすいであろう。

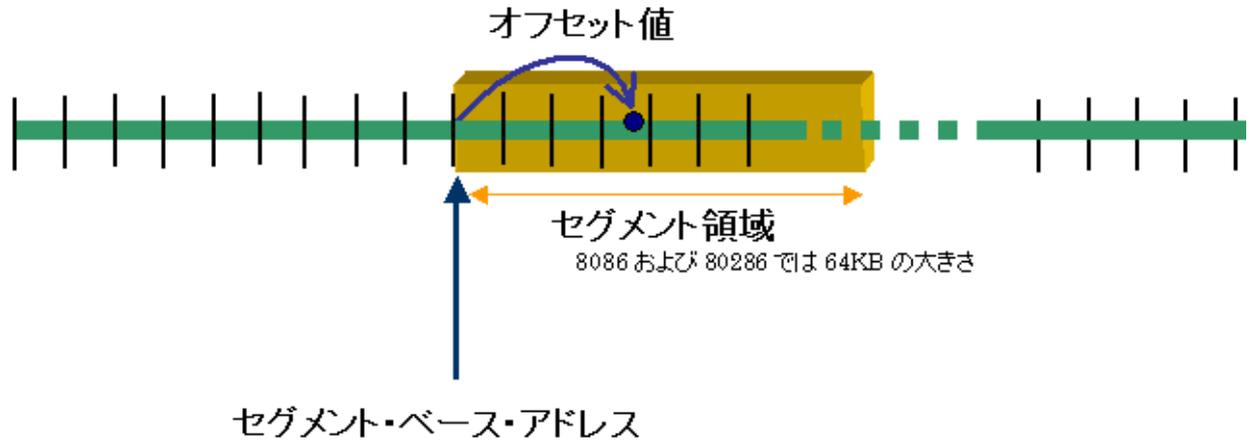
8086 では、実際のメモリ空間上での位置を指定する際に、「セグメント」値を 16 倍した上でそれに「オフセット」の値を加える。 $16=2^4$ なので、こうした操作により、メモリ空間の指定には全部で 16 ビット+4 ビット =20 ビットを利用していることになる。そのため結果的に、 $2^{20}=2^{16}\times 2^4=64\text{KB}\times 16=1024\text{KB}=1\text{MB}$  のメモリ空間が利用できることになる。

もし仮にセグメント値を 16 倍ではなく、 $2^8=256$  倍した上で加算したとすれば、 $2^{24}=16\text{MB}$  のメモリ空間が利用できることになる。またセグメント値を  $2^{16}=65,536$  倍した上で加算したとすれば、 $2^{32}=4\text{GB}$  のメモリ空間が利用できる。

この場合には、アドレス指定に 32 ビットを使用しているのと同じことになる。すなわ

ち、32ビットアドレスの指定に当たり、その32桁の数字の最初の16桁をセグメント値で、残りの16桁をオフセット値で指定したことになる。

図3 x86アーキテクチャにおける物理メモリのアドレス指定法



なお、8086 および 80286 ではセグメント値で指定されたセグメント・ベース・アドレスの「目盛り」から、 $2^{16} = 65,536 \text{ bytes} = 64 \text{ Kbytes}$  までの範囲内の位置を指定できる。このようにオフセット値によって指定可能な領域（図3の黄色の直方体で示されている部分）はセグメント領域と呼ばれている。64KBのセグメント領域の中のある特定の場所を1 byte 単位で指示するには、 $64 \text{ KB} = 65,536 \text{ bytes} = 2^{16} \text{ bytes}$  なので、16 ビットの情報量があればよい。すなわち、64KB のセグメント領域の「オフセット」のために必要な情報量は16 ビットである。

表3 セグメント値とオフセット値の組み合わせ

セグメント値	オフセット値
1234	5678
1235	5668
1236	5658
1237	5648
1238	2638
1239	5628

セグメント値で指定されている「目盛り」は16 バイトごとであり、なおかつ、オフセット値はセグメント値と同じく最大値が65,535 であるから、同じアドレスに対して何通りもの指定が可能である。たとえば、0 のどの組み合わせも、16 進数で179B8 と表記される同じアドレスを指定していることになる。それゆえ、同一アドレスを表すこうした組み合わせは全部で  $2^{12} = 4,096$  通りもあることになる。

### 80286 におけるアドレス指定法の変更

メモリ空間上におけるセグメント・ベース・アドレス（セグメント領域の開始アドレス、すなわち、セグメント領域がメモリ空間上のどこから始まるのかを示すアドレス）を指定するのに、8086 では16 ビットを利用していたが、80286 では16 ビット+8 ビット=24 ビットを利用するように設計変更された（神保進一,1999,pp.109-111）。これは80286 で物理アドレスを指定するバス幅が24 ビットに拡張されたことに対応する措置である。

これにより、セグメント・ベース・アドレスの値は  $2^{20}$  通りまで指定可能になった。それゆえオフセット情報を用いず、セグメント情報のみで、物理メモリのアドレス指定が1byte 単位で  $2^{20} = 2^{20} \times 2^4 = 1 \text{ MB} \times 16 = 16 \text{ MB}$  までリニアに利用可能になった。こうして

80286 では 16MB の物理メモリがサポートされるようになったのである。

### 80386 におけるアドレス指定法のさらなる変更

オフセット値が 16 ビット幅から 32 ビット幅へと拡張された。これにより、セグメントのサイズが  $2^{32}=2^{16}\times 2^{16}=64\text{KB}\times 2^{16}=4\text{GB}$  へと大きく拡張された。これは 80386 が 32 ビット・マイクロプロセッサであることから物理アドレスを指定するバス幅が 32 ビットに拡張されたことに対応する措置である。こうしてセグメント・ベース・アドレスを切り替えることなく、4GB の物理メモリに対して直接的にリニアにアクセスすることが可能になった。

なおセグメントの指定には 14 ビットが使用可能なためオフセット値とあわせて、論理アドレスとしては全部で 32 ビット+14 ビット=46 ビットが利用できるので、 $2^{46}=2^{32}\times 2^{14}=4\text{GB}\times 2^{14}=16\text{TB}$  (テラバイト) まで利用可能になっている。

### c. 互換性維持重視戦略に基づくインテル x86 アーキテクチャの技術的進化

ここまで 8086、80286、80386 における物理メモリのアドレス指定法を紹介してきたことからわかるように、インテルはセグメント・ベース・アドレスやオフセットの指定に用いるビット数の具体的な値を徐々に拡大してはきたが、「セグメントとオフセットによる物理メモリ・アドレスの 2 段階での指定」という物理メモリ・アドレス指定法それ自体の基本的骨組みは変更しないことで、マイクロプロセッサの互換性を維持してきた。

こうしたマイクロプロセッサの互換性維持により、8086/8088 から Pentium に至るまでインテルのマイクロプロセッサは、x86 アーキテクチャという同一の製品アーキテクチャに属するものとなっている。

この結果として x86 アーキテクチャに属するマイクロプロセッサであれば、最新のマイクロプロセッサであっても、1978 年の 8086 用プログラムが動作するのである。このことに関してインテルは、次のように述べている。

IA-32 インテルアーキテクチャは、これまで、コンピュータの進歩の最前線を切り開いてきた。今日では、全世界で使用されているコンピュータの台数と総合的な処理能力から判断して、明らかに最も普及したコンピュータ・アーキテクチャと見なすことができる。IA-32 アーキテクチャが広く普及した 2 つの主な原因は、IA-32 プロセッサ向けに作成されたソフトウェアが高い互換性を持つことと、IA-32 プロセッサの性能が世代ごとに大幅に向上してきたことである。…最新の IA-32 アーキテクチャに先行する開発は、Intel 8085 と 8080 の両マイクロプロセッサから、さらに Intel 4004 マイクロプロセッサ(1969 年インテル設計の最初のマイクロプロセッサ)にまでさかのぼることができる。IA-32 アーキテクチャ・ファミリで 32 ビット・プロセッサが導入される前は、8086 プロセッサや、その直後に発表されたよりコスト・パフォーマンスの高い 8088 プロセッサなどの 16 ビット・プロセッサが使用されていた。歴史的に見て、IA-32 アーキテクチャには、16 ビット・プロセッサと 32 ビット・プロセッサの双方が含まれる。… IA-32 アーキテクチャの重要なメリットの 1 つは、1978 年の発表時の IA プロセッサ用に開発されたオブジェクト・コード・プログラムが、IA-32 アーキテクチャ・ファミリの最新のプロセッサ上で現在でも動作することである。」(Intel (2001)第 2 章「IA-32 インテル R アーキテクチャの概説」p.2-1。なお傍点および太字強調は引用者によるものである。また上記の引用文中における IA-32 アーキテクチャとは、インテルが 32 ビットマイクロプロセッサ用に x86 アーキテクチャを拡張した部分も含めたアーキテクチャのことである。また IA プロセッサとは、基本的な x86 アーキテクチャに基づいて開発されたマイクロプロセッサのことである。)

本節の先行の記述および上記の引用文中に示されているように、インテルは8ビットマイクロプロセッサ8008や8080/8085の開発に際して旧世代製品の4ビットマイクロプロセッサ4004のアーキテクチャを考慮に入れていたし、16ビットマイクロプロセッサ8086の開発に際して旧世代製品の8ビットマイクロプロセッサ8080/8085との互換性をなるべく高くする方向で製品開発に取り組んでいる。そして8086以降の16ビットマイクロプロセッサ、80386以降の32ビットマイクロプロセッサに関してそれらが同一のx86アーキテクチャに属する製品となるように、互換性維持重視戦略に基づく製品開発を行ってきた。

1981年のIBM PCに8088というx86アーキテクチャに基づくインテルのマイクロプロセッサが採用されたことを契機として、16ビットPC用CPUに関するドミナント・ドミナントはx86アーキテクチャとなった。x86アーキテクチャに関わる知的財産権を有しているインテルは、PC用CPUのドミナント・デザインとしてのx86アーキテクチャの地位の維持を目的として、次節で論じる回路線幅の微細化技術の技術的進展によるトランジスタの集積度向上を利用したマイクロプロセッサの性能向上を持続的に追求する一方で、そうした性能向上よりも先行の既存ソフトウェア資産および既存ソフトウェア技術者の開発能力の効率的活用を優先する互換性維持重視戦略を1970年代から1990年代後半期までのマイクロプロセッサ開発に関して採用し続けた。

しかしインテルはマイクロプロセッサ開発における互換性維持重視戦略を64ビット・マイクロプロセッサのItanium(2001発表)開発では採用しなかった。インテルは8ビット・マイクロプロセッサから16ビット・マイクロプロセッサへの製品イノベーション、および、16ビット・マイクロプロセッサから32ビット・マイクロプロセッサへという基本的な製品イノベーションに際して互換性維持重視戦略を採用し続けたにも関わらず、32ビット・マイクロプロセッサから64ビット・マイクロプロセッサへの製品イノベーションに際しては互換性維持よりも製品アーキテクチャの変革による性能向上を優先させたのである。

しかしインテルの64ビット・マイクロプロセッサItaniumはx86アーキテクチャとの互換性が低かった結果として、x86アーキテクチャとの互換性維持を優先して開発されたAMDのマイクロプロセッサとのPC用CPU市場における競争で敗北を喫することとなった。

## (2) 1970～1980年代におけるインテルのマイクロプロセッサ

インテルは表4に示したように、世界最初の4ビット・マイクロプロセッサ4004の開発に引き続き、8ビット・マイクロプロセッサ、16ビット・マイクロプロセッサ、32ビット・マイクロプロセッサというように、マイクロプロセッサに関する製品イノベーションを積極的に推進している。

インテルは、このような絶えざる製品イノベーションによって、競合他社に対する競争優位の確立を図るとともに、マイクロプロセッサ市場への新規参入企業に対する参入障壁を高くした。

こうした絶えざる製品イノベーションはまた、旧世代製品の機能的陳腐化や性能的陳腐化を加速させることで、旧世代マイクロプロセッサの物理的寿命が尽きるよりも前に、ユーザーに新世代マイクロプロセッサへと乗り換えさせる役割も果たした。

インテルは製品イノベーションに際して、表4の「マイクロプロセッサの内部バスのビット幅」、「マイクロプロセッサのデータバスのビット幅」、「マイクロプロセッサがサポートするメモリ空間の大きさ」、「マイクロプロセッサの動作周波数」「マイクロプロセッサのMIPS値」、「マイクロプロセッサを構成しているトランジスタ数」といった各項目の数値の変化に示されているように、旧世代製品から新世代製品へのスイッチング・コストを上回る便益をユーザーに与えるように製品イノベーションをおこなっている。

インテルのこうした製品イノベーションは、回路線幅の微細化によって支えられている。回路線幅の微細化は、動作周波数の向上によるマイクロプロセッサの処理能力向上やトランジスタ数増大を実現すると同時に、製造コストや消費電力の削減を可能にする。

インテルは、1971年の4004の $10\mu$ から出発して、1974年の8080で $6\mu$ に、1976年の8085で $3\mu$ に、1982年の80286で $1.5\mu$ に、1985年の80386で $1\mu$ に、1991年の80486SXで $0.8\mu$ にというように、回路線幅の微細化を推進することによって、表4のようにマイクロプロセッサの性能向上を実現したのである。

すなわち回路線幅を1971年の $10\mu$ から1985年の $1\mu$ へと1/10にまで縮小させることによって、動作周波数を1971年の750KHzから1989年の25Mhzへと約33倍に、トランジスタ数を1971年の2,300個から1989年の120万個へと約500倍に、1秒間に実行できる命令数を1971年の0.06MIPSから1989年の20MIPSへと約330倍に、というように飛躍的な性能向上を実現している。

一つのマイクロプロセッサを構成するトランジスタを増大させることができたことによって、先行するメインフレームやミニコンと同じように、1982年の80286マイクロプロセッサで仮想メモリをサポートすることもできるようになった。しかも仮想メモリの大きさも、1985年の80386DXで64TBと $2^{16}=65,536$ 倍にも拡大されている。こうした仮想メモリの大きさはその当時のHDDの容量が10MB単位に過ぎなかったことや、現在のHDDの容量がやっとTB単位になっていることから考えれば、20数年以上もの期間にわたってボトルネックとはならないくらいの飛躍的な性能向上を実現していたことがわかる。

また一つのマイクロプロセッサの中に搭載可能なトランジスタ数が大きくなることは、マイクロプロセッサにより多くの機能を担わせることが可能になるということの意味している。

表4 Intel社が開発したマイクロプロセッサの技術的スペックの歴史の変遷

ビット幅	バス幅	名称	年月日	動作 周波数	MIPS 値	メモリ 空間	トランジスタ数	回路 線幅	コプロセ ッサー	仮想 メモリ
4ビット	4ビット	4004	1971.11.15	750KHz	0.06	4KB	2,300 個	10μ	---	不可
8ビット	8ビット	8008	1972.04.01	500kHz 800KHz	0.06	16KB	3,300 個			
		8080	1974.04.01	2MHz	0.64	64KB	4,500 個	6μ		
		8085	1976.03	5MHz	0.37		6,500 個			
16ビット	16 ビット	8086	1978.07.08	5 MHz	0.33	1MB	2 万 9 千 個	3μ	8087	
				8 MHz	0.66					
				10 MHz	0.75					
	8ビット	8088	1979.03.02	5MHz	0.33					
				8MHz	0.66					
	16 ビット	80286	1982.03.02	8 MHz	0.9	16MB	13 万 4 千 個	1.5μ	80287	1GB
10 MHz				1.5						
12MHz				2.66						
32 ビット	32 ビット	80386DX	1985.10.21	16MHz	5～6	4GB	27 万 5 千 個	1μ	80387	
			1987.02.16	20MHz	6～7					
			1988.04.04	25MHz	8.5					
			1989.04.10	33MHz	11.4					
	16 ビット	80386SX	1988.06.16	16MHz	2.5					
			1989.01.25	20MHz	2.5					
			1988.06.16	25MHz	2.7					
			1992.10.26	33MHz	2.9					
	32 ビット	80486DX	1989.4.11	25MHz	20		120 万 個	0.8μ	(FPU を 本体に 内蔵)	
			1990.05.07	33MHz	27					
			1991.06.24	50MHz	41					
		80486SX	1991.09.16	16MHz	13					
		1991.04.23	20MHz	16.5						
		1991.09.16	25MHz	20						
		1991.09.21	33MHz	27						

[出典] Intel 製マイクロプロセッサに関するデータは、下記の Web ページを基に、Intel 社の Processor Spec Finder (<http://processorfinder.intel.com/scripts/default.asp>) などを利用しながら、動作周波数など一部データに関して追加や修正などの処理を行っている。

<http://www.intel.com/intel/museum/25anniv/html/hof/techspecs.htm>, [Intel 社作成日 1997 年 4 月 23 日]

<http://www.intel.co.jp/jp/intel/museum/25anniv/html/hof/techspecs.htm>, [Intel 社作成日 1997 年 4 月 23 日]

<http://www.intel.com/pressroom/kits/quickreffam.htm> [Intel 社作成日 2002 年 10 月 1 日]

8085 に関しては、<http://www.st.rim.or.jp/~nkomatsu/intel8bit/i8085.html> の記述に依拠している。

8085 の MIPS 値および 4040 に関しては [http://www.4reference.net/encyclopedias/wikipedia/List\\_of\\_Intel\\_microprocessors.html](http://www.4reference.net/encyclopedias/wikipedia/List_of_Intel_microprocessors.html) の記述に依拠している。

Intel 製マイクロプロセッサの MIPS 値に関しては、<http://www.intel.com/pressroom/quickref.htm>[Intel 社作成日 1997 年 5 月 7 日] を参考にした。

マイクロプロセッサの数値演算の仕方には整数演算と浮動小数点演算の二種類があるが、最初はトランジスタ数の限界のために、浮動小数点数演算をハードウェア的に実行する演算回路を一つのマイクロプロセッサの中に搭載させることはできなかった。

一方で、1970年代末頃からFORTRANなどを利用した科学技術計算の実行や、表計算ソフトやデータベースソフトにおける数値演算などがPC上でもしだいに実行されるようになるにつれてPCに対する浮動小数点演算処理の性能向上が強く求められるようになっていた。

マイクロプロセッサのトランジスタ数の限界のため、1978年の8086から1980年代末の80386DXに至るまで、浮動小数点数演算処理を担う演算ユニットは、マイクロプロセッサを補完する補助的ユニットであるコプロセッサという別モジュール形態で提供されていた。

回路線幅の微細化技術の発展により、表4および図4に示すようにトランジスタの集積度向上が1970年代および1980年代に急激に進んだ結果として、1989年の80486DX以降のマイクロプロセッサでは浮動小数点数演算ユニットを一つのマイクロプロセッサの内部中に統合することが可能になった。

こうしたマイクロプロセッサの多機能化や性能向上によって、OSソフトやアプリケーション・ソフトの多機能化・性能向上も可能になったのであるが、そのことはOSソフトやアプリケーション・ソフトの開発企業がマイクロプロセッサの多機能化や性能向上に対応して絶えず製品イノベーションを繰り返す必要を生み出した。

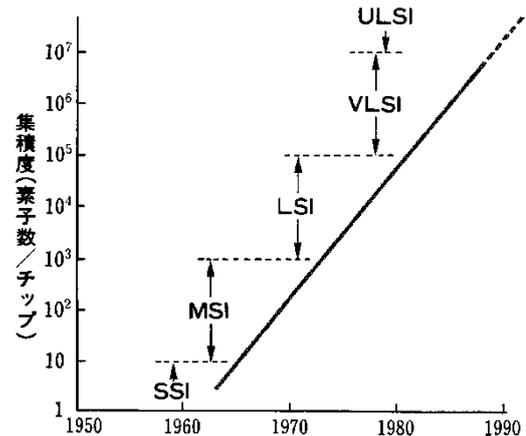
PC用CPU市場において主導的な役割を果たしたインテルのマイクロプロセッサが表4に示されているように短期間で製品イノベーションを成し遂げているため、PC用のOSソフトやアプリケーション・ソフトの開発企業も同じように短期間で製品イノベーションを成し遂げる必要に迫られた。

PC市場におけるこうした短期間での製品イノベーションの繰り返しを、開発のためのコストやソフトウェア開発技術者の技術的能力の制約の下で効率的に実行するためには、製品の基本的アーキテクチャに関しては旧世代製品との互換性を維持しつつ、新しい技術進歩によって可能となる新機能や性能向上を生かした製品開発をおこなうことが有効な技術戦略である。

1980年代にソフトウェア開発企業が一年毎など短期間にバージョンアップを繰り返すことで、ソフトウェアの多機能化と性能向上を成し遂げたのは、そうした技術戦略に基づく製品開発の結果である。このことは競合企業に対する競争優位の維持とともに、新規参入企業に対する参入障壁を高める要因ともなった。

マイクロプロセッサおよびOSソフトやアプリケーション・ソフトに関わるこうした短期間での製品イノベーションの結果として、それらの統合的システム製品であるPCも、短期間で製品イノベーションを繰り返すことになった。次節でこの点を論じることにしよう。

図4 ICの集積度の歴史的推移



[出典]佐々木元ほか(1989)p.27

**(3) 1970年代後半期および1980年代におけるPC市場**

PC市場は、1970年代後半期における8ビットPC、1980年代前半期の16ビットPC、1980年代後半期の32ビットPCというように、マイクロプロセッサが一度に処理できる情報量（マイクロプロセッサのレジスタ幅）を基本として時期区分をすることができる。

ただしPC市場の発展は、そうしたマイクロプロセッサの技術的発展を軸としながらも、マイクロプロセッサ以外の周辺チップや周辺機器に関する技術的発展によって可能になったものである。すなわち、1970年代および1980年代におけるIC技術の急激な発展により、マイクロプロセッサだけでなく、DRAM・SRAMといったメモリ、画像処理チップ、周辺機器制御チップなど、マイクロプロセッサと同じくIC技術に基づく様々な製品に関して画期的な技術進歩が可能になったことにより、1970年代中頃からのPC市場の急激な成長が技術的に可能になった。

実際、米国で1975年頃からPC市場の急激な成長が始まり、出荷台数に関してははやくも翌年の1976年にはPC市場がミニコン市場やメインフレーム市場を上回るようになった。そして出荷金額に関しても1984年には他のコンピュータ市場とほぼ同規模になり、ついに1987年以降にはPC市場がミニコン市場およびメインフレーム市場をともに上回るようになっていく。

こうしたPC市場の急激な成長は、マイクロプロセッサに限らず、PCを構成する様々なモジュールに関して多機能化や性能向上などの製品イノベーションが実現されることにより、PC製品の機能的陳腐化や性能的陳腐化が物理的陳腐化をはるかに上回る速度で進行

表5 米国におけるPC、ミニコン、メインフレームの出荷台数および金額1960,1965-1990の実績値

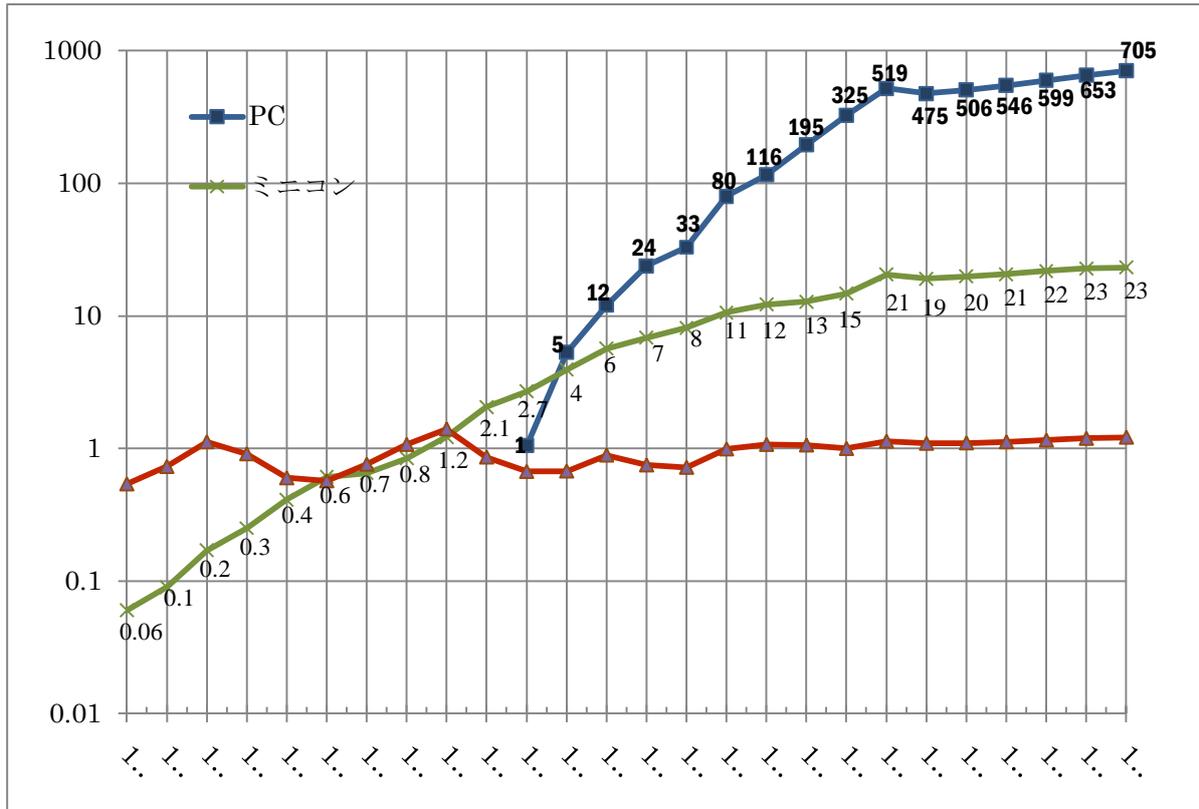
出荷台数(単位:千台)				出荷金額(単位:億ドル)			
年	PC	ミニコン	メインフレーム	年	PC	ミニコン	メインフレーム
1965	--	0.6	5.4	1965	--	0.7	17.7
1966	--	0.9	7.3	1966	--	0.9	26.4
1967	--	1.7	11.2	1967	--	1.6	39.0
1968	--	2.5	9.1	1968	--	2.3	48.0
1969	--	4.1	6.0	1969	--	3.5	41.5
1970	--	6.1	5.7	1970	--	4.9	36.0
1971	--	6.5	7.6	1971	--	5.1	39.0
1972	--	8.4	10.7	1972	--	6.3	50.0
1973	--	12.2	14.0	1973	--	8.5	54.0
1974	--	20.5	8.6	1974	--	13.5	62.0
1975	10.5	27.0	6.7	1975	0.2	14.8	49.6
1976	53.1	39.3	6.8	1976	1.0	18.9	50.6
1977	120.4	56.8	8.9	1977	2.2	27.8	69.4
1978	237.9	68.3	7.5	1978	4.4	36.9	62.3
1979	329.4	81.3	7.2	1979	6.3	47.1	63.4
1980	796.0	105.9	9.9	1980	15.5	62.4	88.4
1981	1,157.0	122.0	10.7	1981	25.5	72.9	96.4
1982	1,950.0	128.0	10.6	1982	43.9	77.7	98.6
1983	3,249.0	146.8	10.0	1983	74.7	89.8	97.8
1984	5,190.0	205.4	11.3	1984	119.4	128.2	119.0
1985	4,750.0	190.8	10.9	1985	112.6	117.0	118.9
1986	5,060.0	198.2	11.0	1986	120.6	118.7	122.0
1987	5,460.0	205.8	11.2	1987	128.9	120.8	126.6
1988	5,990.0	218.1	11.5	1988	140.5	126.6	132.7
1989	6,530.0	227.7	11.9	1989	159.6	130.9	137.9
1990	7,050.0	232.0	12.1	1990	179.8	126.5	141.9

[1965年-1974年のデータの出典]Juliussen,K., Juliussen,E.(1990)Chapter 10のp.8

[1975年以降のデータの出典]Juliussen,K., Juliussen,E.(1994)p.317

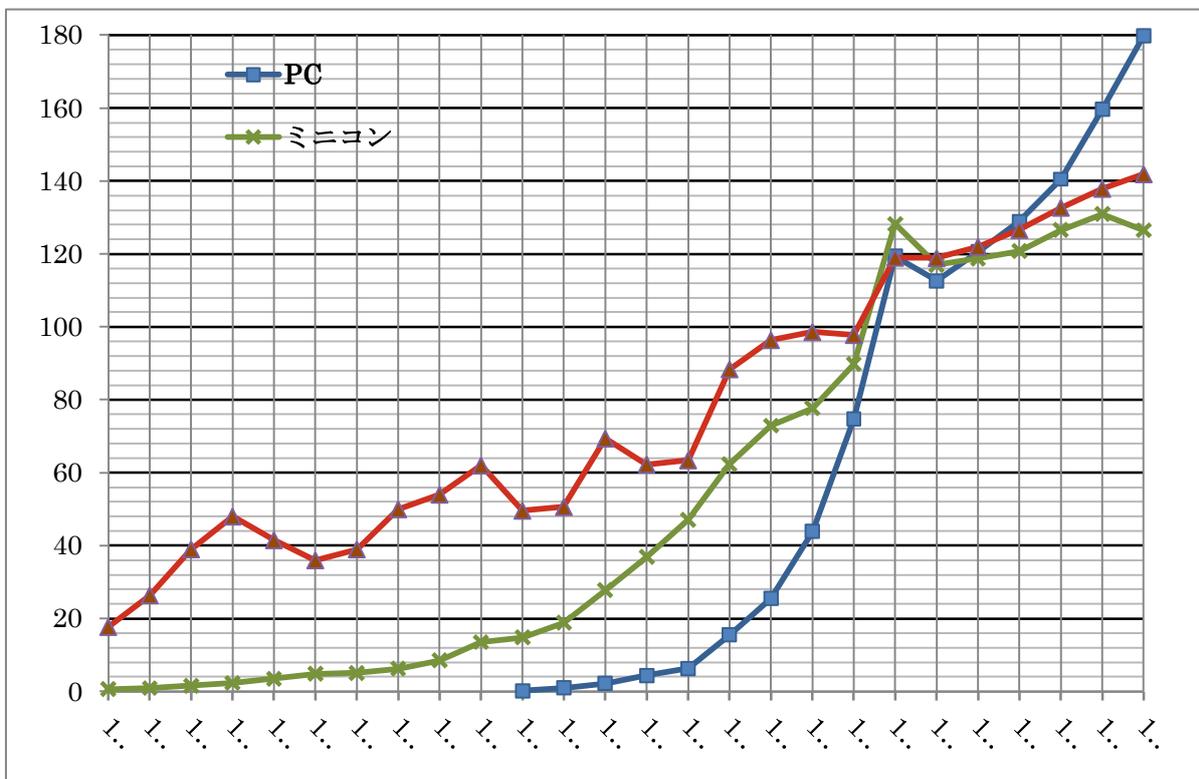
したことにある。そのことは図7や図8のグラフにも示されている。

図5 米国におけるPC、ミニコン、メインフレームの出荷台数の歴史的推移(単位:万台、対数表示)



[出典]表5に同じ

図6 米国におけるPC、ミニコン、メインフレームの出荷金額の歴史的推移(単位:億ドル)



[出典]表5に同じ

PCを構成する様々なモジュールの絶えざる多機能化や性能向上により、PC製品に対する新規需要が絶えず喚起されるだけでなく、8ビットPCから16ビットPCへの買い換えや16ビットPCから32ビットPCへの買い換えなどPC製品の買い換えサイクルの短期化による買い換え需要も生じた。

そしてさらにまた新世代製品登場後も、経験曲線効果などによる旧世代製品の価格低下が推し進められることによって、旧世代製品の販売が一定期間は続けられた。

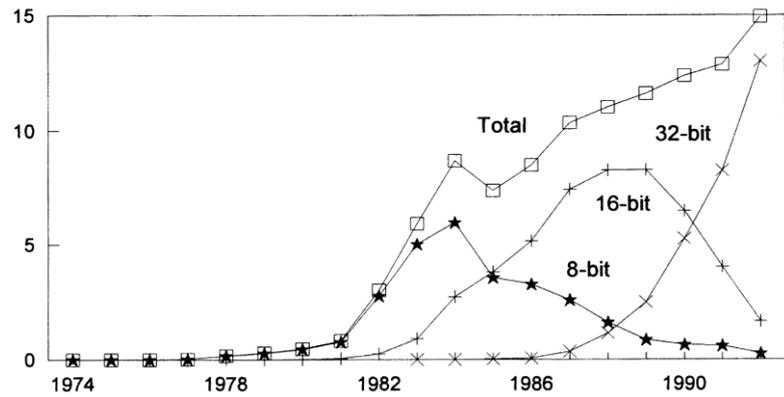
例えば日本では16ビットPCのNECのPC9801シリーズが1982年に販売開始された後も、1983年に8ビットPCのMSXシリーズがソニーHB-101(1983)、富士通FX-X(1983)、東芝のASOPIA IQ HX-10D、HX-10S(1983/11)など様々な企業から販売開始された。そしてさらにCPUは8ビットマイクロプロセッサのZ80相当品のまま

であるものの、メインメモリRAMを最小64KBとするとともに最大4MBまでの拡張を可能にするなどの性能向上を図った後継規格であるMSX2シリーズが1985年から販売開始され、両方のMSXシリーズ総計で約400万台が出荷されたと言われている。

またAppleは、IBMが16ビットPCを出荷開始した1981年以降も、8ビットPC製品の販売台数を順調に伸ばしており、1983年には1981年の約2.5倍にもなっている。

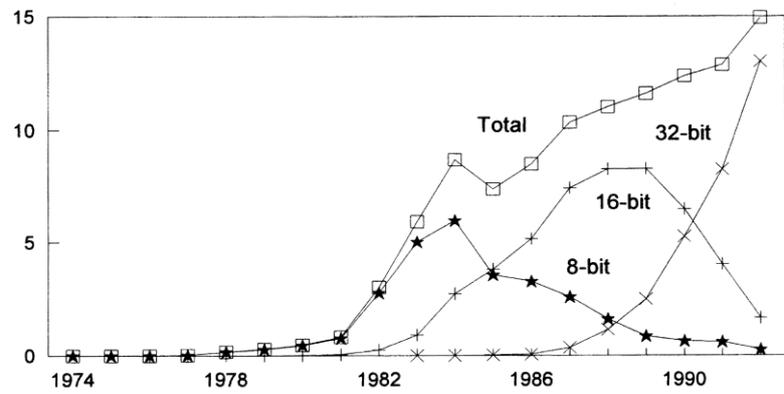
このように、PC製品に関する急激な製品イノベーション、および、旧世代製品と新世代製品の併存により、PC市場は1980年代においても持続的成長を遂げたのである。

図7 CPUのビット数別年間PC販売金額の歴史的推移(1974-1992)



[出典] Bayus (1998) p.767, 単位:百万ドル。原出所はIDCのProcessor Installation Census。

図8 CPUの種類別(Z80,80888,80286,80386DX)の年間PC販売金額の歴史的推移(1974-1992)



[出典] Bayus (1998) p.767, 単位:百万ドル。原出所はIDCのProcessor Installation Census。

図9 Appleの8ビットPC製品の年間販売台数推移

	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983
Apple I	0.2						
Apple II/Iie	0.6	7.6	35	78	180	279	420
Apple III					6	20	35
合計台数	0.8	7.6	35	78	186	299	455

[出典] Burgelman et al.(1988)p.298。単位:千台。

## 参考文献

- Bayus, Barry L. (1998) “An Analysis of Product Lifetimes in a Technologically Dynamic Industry,” *Management Science*, Vol. 44, No. 6 (Jun., 1998), pp.763-775
- Bayus Barry L., Erickson, G., Jacobson, R.(2003) “The Financial Rewards of New Product Introductions in the Personal Computer Industry,” *Management Science*, Vol.49, No.2,pp. 197–210
- Burgelman ,R. A.; Maidique, M. A. (1988) *Strategic management of technology and innovation* , Irwin
- Hayes, John P. (1980) “Technology Changes in Personal Computers,” *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol.10 Issue 8, pp. 476 - 480
- Holmen, Milton G. (1980) “Who is Using Personal Computers?,” *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol.10 Issue 8, pp.480 - 496
- Intel(1999) 『インテル・アーキテクチャ・ソフトウェア・ディベロッパーズ・マニュアル』上巻「基本アーキテクチャ」
- Intel(2001) 『IA-32 インテル®・アーキテクチャ・ソフトウェア・ディベロッパーズ・マニュアル』上巻「基本アーキテクチャ」(ftp://download.intel.co.jp/jp/developer/jpdoc/24547003\_j.pdf よりダウンロード可能)
- Juliussen, K., Juliussen, E.(1990) *The Computer Industry Almanac 1991*,Simon and Schuster
- Juliussen, K., Juliussen, E.(1994) *The Computer Industry Almanac 1993-1994*, Simon and Schuster
- Warren, J.(1977) "Personal and Hobby Computing: an Overview," *Computer*, Vol.10, Issue.3, pp.10-22
- Williman, A. O., Jelinek, H. J. (1976) “Introduction to LSI Microprocessor Developments,” *Computer*, June 1976,pp.34-46
- 神保進一(1999) 『最新マイクロプロセッサテクノロジー』日経 BP 社
- 佐々木元、河村信雄、清水京造(1989) 『超 LSI の話』日本電気文化センター
- 嶋正利(1987) 『マイクロコンピュータの誕生』岩波書店

---

(i) 1976年6月9日の調査結果の合計値は、Warren(1977)論文では投票者総数の101となっているが、表1では各CPU別の値を合計した数値である103に訂正した。また1976年7月1日の投票結果に関しては製作途中(under construction)の28は除外してある。

なおHomebrew Computer Clubでは、インテル系CPUが全体の過半数を超える割合を占めているが、Mos Technologyの事務所からさほど遠くはない場所にあったNew JerseyのAmateur Computer GroupではMOS Technology 6502が支配的(dominant)であった(Warren,1977,p.14)。