

# マイクロプロセッサーIntel 4004の製品開発プロセス

佐野正博

はじめに.....	1
1 日本のビジコン社からの電卓用部品の依頼を契機とした製品開発 .....	4
(1) 「ハードワイヤードロジックによる専用LSI」方式から「プログラム駆動による汎用LSI」方式への転換.....	4
(2) 内蔵プログラムに関する「マクロ命令」方式から「マイクロ命令」方式への転換 --- ホフのアイデアの受け入れに基づくマイクロプロセッサー開発への取り組み開始.....	7
(3) ビジコンの設計プランにおける専用LSIの種類の数をめぐる歴史的証言の食い違い .....	10
(4) マイクロプロセッサー「発明」の漸進的性格 --- マイクロプロセッサーの技術論的定義の視点からの歴史的考察	11
2 4004の技術的性能 .....	13
a. 命令実行性能 0.06MIPS .....	13
b. 命令長、および、メモリ空間の大きさ .....	14
3 マイクロプロセッサーという名称の由来 .....	14
4 システム性に配慮した製品開発 --- 製品番号が4004となった理由 .....	15
5 電卓とパソコンのバリュー・ネットワーク論的共通性 ---- 製造コスト低減を優先させた製品開発 .....	17
引用図版の出典 .....	20
4004関連の参考文献案内.....	20
a. 4004を含むシステム「MSC-4」に関する1972年の学会発表.....	20
b. 4004の最初の広告.....	20
c. 4004関連のインテル社資料 .....	20
d. 4004の歴史関連のその他資料 .....	21
e. マイクロプロセッサー開発に関連した嶋正利の著作 .....	22
f. 嶋 正利の略歴などに関する参考資料 .....	25
g. ビジコン社関連資料 .....	25
【注】 .....	26

## はじめに

本稿の目的は、PCという製品セグメントの成立を可能にしたキー・モジュールであるマイクロプロセッサーが最初に生み出された1971年頃の歴史的状況および歴史的プロセスを分析することで、PCという製品セグメントの成立を可能にした技術的条件を解明することにある。

個人が占有的に利用するコンピュータという製品コンセプトやそうした製品に対する社会的期待はかなり以前から存在してはいたが、PCとして必要とされる機能や性能を有したマシンをPCという製品セグメントに対応した製造コストで製造することが実際に可能になったのは1970年代中頃である。

もっとも個人利用に適したスペックのマシンを製造することそれ自体は、半導体技術の進歩により1960年代末頃に技術的には可能になっていた。1950年代における電子計算機は真空管を電気回路素子として利用していたこともあり一部屋を占有するほどの大きなサイズであったが、1960年代になりトランジスタやダイオードといった半導体を電気回路素子として用いる技術の発達により小型化や低消費電力化が進んだ。すなわち、半導体素材に関するゲルマニウムからシリコンへの転換の進展や、キルビー特許やプレーナー特許といった集積回路に関する基本的発明を受け半導体素子を利用した電気回路の集積度向上が1960年代に進んだことにより、個人的業務用に利用するコンピュータとして必要とされる機能や性能を確保した上で個人占有に適した大きさへの小型化や家庭用電圧での動作が1960年代末には技術的には可能になっていた。しかしそれらのマシンは、個人が占有的に利用するコンピュータには適さない価格であった。

PCという製品イノベーションが1970年代中頃以降に可能になったのは、1970年代における半導体製造技術の発展、特にMOS型半導体に関する製造技術の発展によるものである。すなわち1970年代に、MOS型半導体のタイプに関するPMOSからNMOSそしてCMOSへの技術転換や、半導体集積回路の線幅の微細化に関する技術発展などによって半導体素子の動作の高速化、低消費電力化、高集積度化、製造コスト低下が進んだのである。

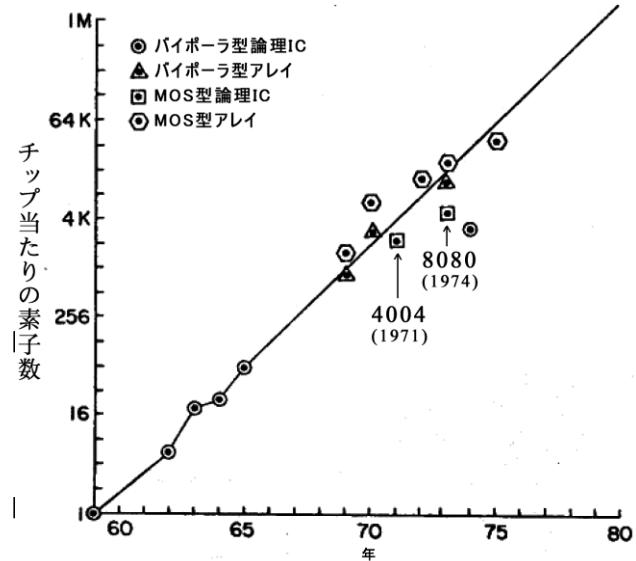
とはいえる1970年代中頃における半導体メモリは、DRAM 1チップ当たりの記憶容量が1970年で1Kビット、1974年で4Kビットと低かっただけでなく、1チップ当たりの価格も個人用途としてはまだ相対的に高価格であり、半導体メモリの大量使用は価格的に困難であった。そのため技術的性能よりも低価格化の方が優先されるPCという製品では、半導体メモリとしては相対的に低価格であるDRAMでさえその搭載容量は市場で要求される最低限度の動作が可能なまでに抑えられていた。

例えば、成功した最初の商用PCとされるMITS社のAltair8800 (1975)は、低価格販売のために標準では256バイトのメモリしか搭載していなかった。機械語による動作ではなく、BASIC言語など高級言語によるプログラム動作のためにはメモリ拡張が必要不可欠であったけれども、主記憶拡張用のDRAMメモリカードのキット価格は容量4Kバイトで264ドルもするなど、本体キット価格439ドルに対してかなり割高であった。そのため、Tiny BASICなど2K~3Kバイト程度の小さな主記憶容量でも動作可能なプログラム言語が1970年代中頃のPCでは広く用いられた。

1970年代中頃のPCにおけるメモリの搭載量がそのように限定されたものであったことから、動作可能なプログラムは限定されていた。またその当時のPCの多くのCPUは最大で64Kバイトのメモリ空間までしかサポートしていなかったので、搭載メモリ量を限界まで拡張したとしてもメインフレームやミニコンで動作させているような大きなプログラムは動作困難であった。

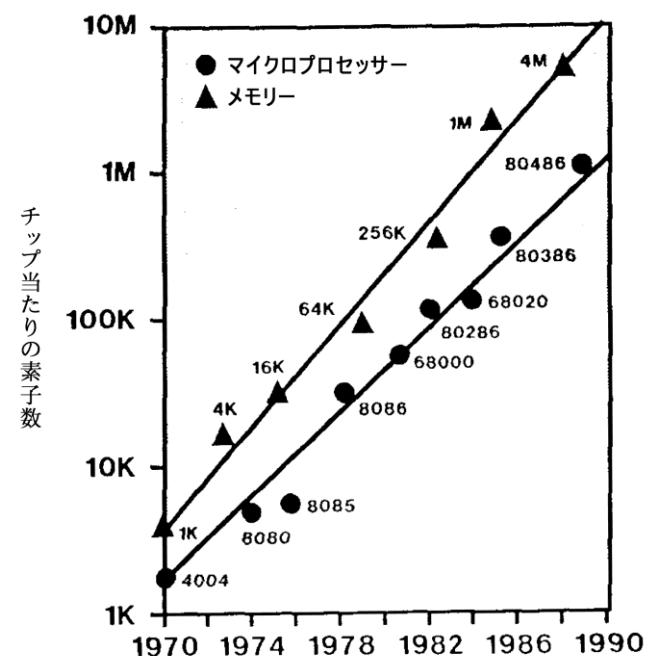
それにも関わらず、PCはホビイストなどマニア層を中心として熱狂的な支持を受けた。こうしたこととは、PCがメインフレームやミニコンなど上位階層のコンピュータとはまったく異なるニーズに対応した製品であることを示すものである。

図3 ICの集積度の歴史的推移(その1)



[出典] Moore (1975) p.11。日本語表記に修正するとともに、4004と8080の表記を追加した。

図4 ICの集積度の歴史的推移(その2)



[出典] Barrett(1989)

PC製品に対するニーズのそした特異性は、PC用CPUの歴史的起源にも示されている。PC用CPUはMOS型半導体技術を利用した1チップLSIのマイクロプロセッサーであったが、そしたマイクロプロセッサーは本稿で以下に論じているように、電卓用CPUとして開発されたものであった。

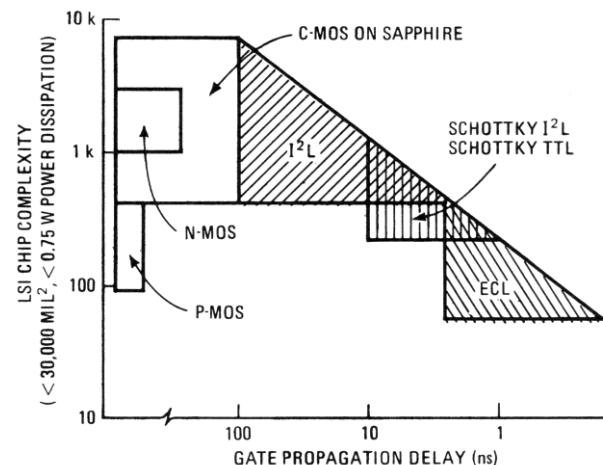
MOS型半導体は、バイポーラ型よりも高集積度化に相対的に有利とはいえ、1970年代における集積度は図1や図2に示されているように、メインフレームやミニコンのためのCPUとして必要とされる機能を実現するにはまだ低かった。また図5のゲート遅延時間のタイプ別比較に示唆されているように、MOS型半導体はバイポーラ型半導体に比べて低速にしか動作しなかった。

ただし図6に示されているように、MOS型半導体はバイポーラ型半導体よりもかなり低価格であった。

そのため1チップLSIのCPUという意味でのマイクロプロセッサーは、多くの機能や高性能性をさほど必要とはしない電卓用CPUとしてまず1970年代初頭に開発された。その後のMOS型半導体に関する技術発展による性能向上の結果として、1970年代後半にはマイクロプロセッサー利用がPCレベルでも可能となったことにより、PC製品セグメントの成立が可能になった。そしてMOS型半導体に関するさらなる技術発展により1990年代にはメインフレームでもMOS型半導体技術を利用したマイクロプロセッサーが採用されるようになっている。

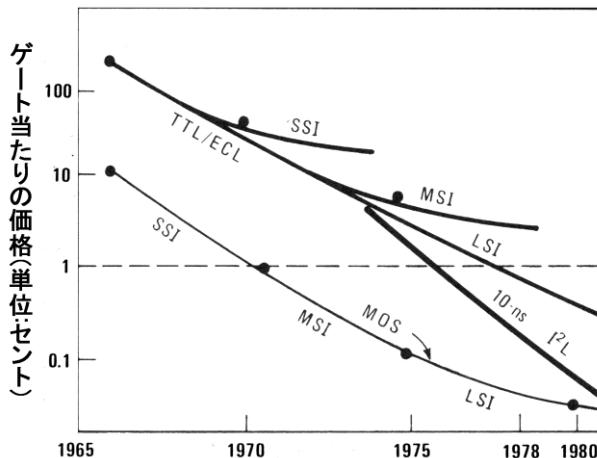
PCという製品イノベーションがこのようにクリステンセン的な意味での破壊的イノベーションとなつた技術的根源の一つは、PCの主要モジュールであるマイクロプロセッサーそれ自体がこのように破壊的イノベーションの側面を持っていたことがある。本稿の目的は、最初のマイクロプロセッサー4004の開発経緯を分析することでそのことを明確化することにある。

図5 ゲート遅延時間のタイプ別比較



[出典] Altman(1976) p.19。斜線部のバイポーラ型半導体L<sup>2</sup>L、TTL、ECLは、PMOS、NMOS、CMOSなどのMOS型半導体よりもゲート遅延時間が一桁ないし二桁小さいのでより高速に動作する。

図6 ゲートあたりの価格の推移



[出典] Altman(1976) p.19。日本語表記に修正。1976年以後は推測値。SSIは集積度100以下、MSIは集積度1,000以下の集積回路のことである。上側がバイポーラ型半導体で、下側がMOS型半導体である。

## 1 日本のビジコン社からの電卓用部品の依頼を契機とした製品開発

### (1) 「ハードワイヤードロジックによる専用LSI」方式から「プログラム駆動による汎用LSI」方式への転換

世界最初のマイクロプロセッサーとされるインテルの4004は、「高級電卓のコストダウン」を意図した日本のビジコン社からの汎用LSIの開発依頼を契機として生み出された。

ビジコンは、もともとは手回し計算機の製造販売を手がけていた会社であるが、電動計算機の販売やリレー式計算機の開発も手がけていた。1960年代には三菱電機の国産会計機MAM（三菱アカウンティングマシン）や、三菱電機のMELCOM 1101(1960)、1530(発表1963、販売開始1964)、3100(発表1966)などMELCOMシリーズのコンピュータも販売している。

このようにビジコンは、コンピュータ技術の歴史的発展に対応した事業展開を図っていた会社であり、「コンピュータの総合企業」となることを目標としていた。ビジコンは、「コンピュータのフルラインナップを揃えることを基本戦略」（奥田耕士,2000,p.33）とし、「大きなコンピュータは三菱電機製品を扱い、小さなコンピュータは自前で品種展開」していた（奥田耕士,2000,p.35）のである。

その意味でビジコンは単なる「電卓メーカー」ではなかったのであり、後述するように、インテルへのLSI開発の依頼もビジコンのこうした製品戦略的視点から理解する必要がある。電卓用LSIの開発に当たってビジコンが、多機能・高性能な高価格電卓のためのプログラマブルな汎用LSIの開発をインテルに依頼すると同時に、少機能・低性能な低価格電卓のためのワンチップ型専用LSIの開発をモステックに依頼していたことは、ビジコンがコンピュータ製品のフルラインナップ化を戦略的におこなおうとしていたことを示すものである。

ビジコンが手動の機械式計算機に加えて電卓事業も手がけるようになった契機は、同社の小島義雄が1961年のロンドン博覧会で世界初の真空管式電卓Anita Mark 8を見つけ日本に輸入・紹介したことにある。1965年にはトランジスタ式電卓であるUnicon 160で電卓市場に参入し、1966年7月には小型磁気コアメモリを搭載したトランジスタ式電卓Busicom 161を販売開始している。Busicom 161は、16桁の加減乗除と平方根の計算ができた。それまでの電卓は、シャープの電卓コンベット21Aがメモリー機能なしで14桁の加減乗除対応で43万5000円もするなど、40万円台の価格であったこともあり、29万8千円という価格のBusicom 161は大ヒットした。

しかし1967年頃からは、トランジスタに代わってICが電卓の論理素子として使用されるようになり、電卓のさらなる低価格化が進んだ。1969年にはシャープがMOS LSIを使用した8桁電卓「マイクロ・コンベット QT-8D」を9万9800円で販売開始し、電卓業界に衝撃を与えた。ICの集積度を高めたLSIの使用により電卓価格はさらに急速に低下した。

その当時の電卓の制御方式は、ハードワイヤードロジック(hard-wired logic)方式であった。ハ

ードワイヤードロジック方式とは、トランジスタやダイオード、抵抗、集積回路（IC）、磁気コアメモリなどの回路素子をプリント基板上に配置し、基板上の配線によってハードウェア的に論理が組み上げられており、マシンに対する動作命令をソフトウェア的に処理するのではなくハードウェア的に実行する制御方式である。そのため、電卓の機能変更や新機能追加などの仕様変更に対応するには基板上の配線を変更することが必要であった。

たとえばシャープの電卓QT-8Dは、「キーボード／表示」用LSI[NRD2256]、「アドレス制御」用LSI[AU2271]、「小数点制御」用LSI[DC2266]、「計算ユニット」用LSI[AC2261]という4つのLSIで構成されていたが、ハードワイヤードロジック方式であったため、「柔軟性が全くななく、電卓の機能を変更しようとすると全てのLSIを変更しなくてはならなかった」（嶋正利,1995a,p.57）のである。しかしながら、こうした配線変更を実施するためには多くの開発時間や多額の開発コストがかかった。

シャープのQT-8Dなどの機種のように同一製品を大量生産し大量販売する低性能機では「規模の経済」効果により配線変更に関わる開発コストを吸収することができハードワイヤードロジック方式の方が電卓の製造単価を下げる事ができたが、高級電卓を主力とし同一機種の生産量が少ない高級電卓には不向きな方式であった。

ビジコンは、その当時いくつもの企業へ電卓のOEM供給をおこなっていたが、電卓の仕様は納入先によって異なるため、ハードワイヤードロジック方式では異なる機種ごとに電卓用ICをそれぞれ個別に新規に開発・製造する必要があった。

そのためビジコンは、高級電卓の制御方式をハードワイヤードロジック方式から、ROMへのプログラム内蔵方式へと変更することで、新機種の開発やOEM先ごとに仕様の異なる電卓の開発に際して、ハードウェアに対する開発工数を増やすことなく電卓機能の追加や変更を可能にしようと考えた（嶋正利,1987,p.16および嶋正利,2006b）。すなわち、処理機能がハードウェア的に作り込まれており特定製品にしか対応しない専用LSIを開発するという従来の方式に代わりに、処理機能をソフトウェア的に作り込むことで複数の製品群に対応可能な汎用LSIを開発することで、製品の多機能化や開発期間の短縮を可能にさせると同時に、製造コストの低減を実現しようとしたのである。

しかも、このようにプログラマブルな汎用LSI化することは、その用途が電卓以外の分野にも広がることを意味する。ビジコンは、NCRと共同でレジスター開発をおこなっており、それにも利用しようと考えていた、と言われている<sup>(1)</sup>。

図7 4004を使ったプリンタ付  
き電卓141-PF 図8 4004シリーズを使ったNCR向け  
キャッシュレジスター 図9 4004を使ったNCR向けビリングマシン



[出典]嶋正利(2007m)



[出典]嶋正利(2007n)



[出典]嶋正利(2007n)

そのためビジコンは1968年には米国のリサーチ会社と契約し、1000万円以上の調査費をかけて情報を収集・分析した結果として、LSIの開発委託先としてモステックとインテルを選び出した（奥田耕士,2000,p.50）。

ビジコンは、ワンチップ用電卓のためのLSI開発をモステックに委託し、1970年6月16日に契約を結んでいる。シャープのQT-8Dといった機種のように「小さくて安い電卓を作るだけならワンチップLSIを採用して大量生産する方法が有利」であるが、そうしたワンチップ方式で大量生産するLSIの開発はモステックに委託したのである。

これに対してビジコンは、インテルに対しては上述のように、「ROMオリエンティッドな計算機」すなわち「ソフトウェア・オリエンティッドな計算機」のための汎用LSI開発を委託することとし、1969年4月28日に基本合意の契約書を交わし、1970年2月6日に本契約を結んでいる（奥田耕士,2000,p.60）。

LSI開発の委託先としてのモステックとインテルとの対比にも示されているように、ビジコンは、汎用LSIの動作を規定するプログラムをROMメモリの中に内蔵させ、メモリの内容を変えるだけで多種多様な機能を持たせることができる製品設計により、「デスクトップ電卓だけでなく、請求書作成機、キャッシュ・レジスター、銀行の預払機などのような事務機でも使えるようなLSI群」(Faggin et al.,2007,p.4)を開発することを1969年には決定していたのである。

ビジコンは、ハードウェアをモジュラー型モジュール化して多様な機種で利用可能な汎用的モジュールとすることでハードウェア製造に関する「規模の経済」効果およびハードウェアの研究開発費用に関する「範囲の経済」効果を追求するとともに、特定用途への対応や特定機種向けの作り込みをソフトウェア的に対応することによって、個別製品の開発時間短縮と製造コスト削減を図ろうと考えたのである。

## (2) 内蔵プログラムに関する「マクロ命令」方式から「マイクロ命令」方式への転換 --- ホフのアイデアの受け入れに基づくマイクロプロセッサー開発への取り組み開始

ビジコンは、こうした製品設計に対応した汎用LSI、すなわち「何種類もの電卓やビーリング・マシンなどのビジネス機器に応用できる、電卓用の汎用LSI」(嶋正利,1987,p.21)の開発をインテルに依頼した。すなわち、ビジコンは、「計算機能のほかにかなりの入出力機器(キーボード、メモリ、表示、プリンタ、CRT、IBMカードなど)を持った電卓や、伝票発行機や銀行の端末機などのOA機器にも使える」(嶋正利,1995a,p.59)ことを目的とした汎用LSIをインテルと共同開発しようとした。

1969年6月20日、電子技研(ビジコンの子会社)の嶋正利らはこうしたプログラム論理方式の電卓用汎用LSI開発のために渡米し、インテルの技術者と共同で開発を始めた。プログラム論理方式とは、「電卓の機能をなるべく細かいレベルの動作にまで分解し、汎用化させて、それをマクロ命令として定義し、次にこのマクロ命令を用いてプログラムを組み、電卓の機能を実現させる方式」(嶋正利,1987,p.32)であった。

渡米前の第一次案の設計プランでは、表1のように「タイミング回路、プログラム制御、アドレス制御、中央演算ユニット、命令用ROMメモリー、データ用シフトレジスタ、キーボード/表示、プリンタ制御、プリンタ用バッファなど、最大9種類のLSI」の新規開発を予定していた(嶋正利,2007b)<sup>(2)</sup>。

渡米後に作成した第二次案では、アドレス制御用LSIの機能をプログラム制御用LSIに担わせるなど、各LSIの機能と論理量を最適化し、各LSIのトランジスタ数の総計値を17,800から11,900へと2/3に削減するとともに、製品に必要な専用LSIの種類を「表示付き電卓で6種類、プリンタ付き電卓で8種類」(嶋正利,2007c)までに減少させた。しかしながらそれでもなお、ビジコンが目標としていた製造コストの実現は困難であった。

というのも、ビジコンがインテルにLSIの開発依頼をした電卓は高性能・多機能な高級電卓だったため、シャープとロックウェルが1968年から共同開発した専用LSI方式電卓のマイクロ・コンペットQT-8D(1969年発表)のような小型携帯用で8桁表示の低性能・小機能な電卓とは異なり、製品の機能・性能の実現に必要なトランジスタ数がかなり多かったからである。

表1 新規開発専用LSIに関するビジコンの設計プラン

専用LSIの種類	トランジスタ数		ピン数
	一次案	二次案	
1 タイミング回路	1,000		24
2 プログラム制御	2,400	800	16
3 アドレス制御	2,000	--	--
4 中央演算ユニット	2,000	1,500	24
5 ROM(命令用)	3,500	2,600	16
6 シフトレジスタ(データ用)	2,000		16
7 キーボード/表示制御	2,400	2,000	24
8 プリンタ制御	1,500		16
9 プリンタ用バッファ	1,000	500	16
トランジスタ数の合計値	17,800	11,900	

[出典] 嶋正利(2007b)「世界初のCPU「4004」開発回顧録(3)」

世界初のMOS LSIを使用した電卓であるシャープのQT-8Dは、「キーボード／表示回路」用LSI[DC2266]、「アドレス制御」用LSI[]、「小数点制御」用LSI[]、「中央計算ユニット」用LSI[]という主要チップで4種類、「タイミング用」LSIを勘定に入れると5種類の専用LSIから構成され、表2に示したようにトランジスタ数の合計はビジコンの第二次案の3割以下の3,453に過ぎず、それらの専用LSIの合計価格は約75ドルであった<sup>(3)</sup>。

ビジコンはシャープと相対的に比較して高性能性と多機能性を実現するために大きなトランジスタ数を必要とした。そのため、ビジコンの電卓がターゲットとする価格帯に見合った製造コストの実現は困難であった。1969年8月21日にインテルがビジコンに送った見積

もりによれば、「ビジコンのLSIの複雑性はシャープと比較して2,3倍しており、システムを組む上で必要なLSIの個数は、シャープの場合5個であるが、ビジコンの場合最低10個必要とし、最大15個必要となる。したがって、システムとしてのキット価格は1970年に300ドル、1972年に150ドルとなり、仮開発契約にうたった50ドルのキット価格を保証することは難しい」(嶋正利, 1987,p.38)とされており、インテルとビジコンの共同開発は暗礁に乗り上げたのである。

こうした困難を克服するための技術的アイデアが「LSIのマイクロプロセッサー化による汎用性の実現」というインテル社のテッド・ホフ(Marcian E. "Ted" Hoff)のアイデアであった。ホフはビジコンの高級電卓の製造コスト低減のために、モジュールの汎用性による「規模の経済」効果や「範囲の経済」効果を利用しようと考えたのである。

ホフは、開発コスト低減と開発時間短縮のために、ビジコンが想定したマクロ命令と同等の機能を、機械語レベルのマイクロ命令で実現する設計アイデアを提案した。「N桁の計算機をN桁のマクロ命令を使って作る」10進コンピュータ方式の代わりに、「4ビットのLSIを作つてあとはプログラムでN桁を実現する」2進コンピュータ方式(嶋正利, 1989,p.48)をホフは提案したのである。

表2 シャープの電卓  
QT-8D用LSI

機能	トランジスタ数
アドレス制御	633
小数点制御	740
	900
	940
タイミング	240
総計	3,453

[出典]嶋正利(1987) p.38 およびFree,J.R. (1971). "Microelectronics Shrinks the Calculator". *Popular Science*, Vol.198 No.6, p.75

表3 ビジコンの最終案とインテルの対案の比較

ビジコンの最終案			インテルの対案		
LSIの種類	トランジスタ数	価格(ドル)	LSIの種類	トランジスタ数	価格(ドル)
1 タイミング	1,000	20	タイミング	500	20
2 プログラム制御	1,500	30	中央演算ユニット	1,800	35
3 中央演算ユニット	1,500	30	データRAM	1,300	20
4 プリント制御A	1,500	30	ROM	2,600	20
5 プリント制御B	1,500	30	ROM	2,600	20
6 プリント出力	700	20	ROM	2,600	20
7 プリント出力	700	20	ROM	2,600	20
8 ROM	3,400	30	ROM	2,600	20
9 ROM	3,400	30	プリント出力	500	20
10 データ・メモリ	1,800	30			
合計			合計	17,100	195

[出典]嶋正利(1987)p.51の表3を基に一部修正。

4ビットのCPUをLSIで新規開発するというホフのアイデアは、キーボード、ディスプレイ、プリンターなどリアルタイム制御を必要とする入出力機器に関してハードウェア制御からソフトウェア制御に置き換えるても問題を生じないかどうかといった点などに関して検討が必要であった。問題は、数値演算処理と同時にキーボードスキャン、画像表示処理、プリンタ制御など入出力装置のリアルタイム制御処理を、4ビットCPUという一つのLSIハードウェアでこなすことができるかどうかにあった。ホフのアイデアに基づく製品化が実際に可能であるかに関して、ビジコン側で高山省吾がハードウェアの検討を、嶋正利がCPUの命令体系や電卓用LSIファミリー・チップなどの検討をおこない、実現可能性が確認された。

機械語レベルのマイクロな命令でプログラムを組むことによってハードウェアの単純化と汎用性の向上を実現するという方向性が高く評価され、インテルとビジコンとの本格的共同開発作業が開始された(嶋正利,1987,pp.45-46)。

このようにホフのアイデアが世界最初のマイクロプロセッサー4004という製品の発明へとインテルを導く出発点となったのであるが、実際のマイクロプロセッサーの製品設計や製品開発の作業において主導的な役割を果たした一人が嶋正利であった。

なお1969年9月16日付けのインテルからの手紙によれば、マイクロプロセッサーを用いた場合のコスト試算は表3に示されているように、総トランジスタ数はほぼ同じであったが、製造コストはビジコンの最終提案よりも約3割低かった。

ビジコン側の案におけるトランジスタ数は実際の論理図から計算されたものであるのに対して、インテル側の案は単なる推測の域を出るものではなく正確ではなかったし<sup>(4)</sup>、LSIの構成にも問題点があったが、新規開発を必要とするLSIの種類は表3のビジコンの最終案で8種類、インテル案で4種類となっており、インテル案の方がビジコン案の半分となっていた。

このように、「誰の目にもインテル社案の方がLSIの種類も少なく、個々のLSIの複雑性ははるかに簡単であり、設計の容易さがはっきり予想された」(嶋正利,1987,p.50) ことが、インテルの対案の方向で製品開発をおこなうように最終的に決定された要因の一つである。

ただしビジコンの技術者たちはすぐにホフのアイデアに賛成したわけではなかった。高山省吾はホフ案に関して「冗談じゃないって感じでしたね。こちらはもう回路を組んでプロトタイプまで動かしていたのですから。それを全部いちからやり直すのにはスケジュールの面からも無理がありました。はっきり言って、本当はやりたくなかったですね。」(奥田耕士,2000,p.64) とインタビューで答えている。

これに対してビジコン社長の小島義雄は、「プロセッサの考え方を採用すれば、フレキシブルで先の応用が期待できる。・・・コンピュータの進化にも対応しやすい。電卓の枠の中だけで考えたくなかった」(大崎眞一郎,2003)ということから、ホフ案の採用に賛成したのである。

### (3) ビジコンの設計プランにおける専用LSIの種類の数をめぐる歴史的証言の食い違い

前述したように嶋によると、ビジコンの第二次案以降の設計プランでは、新規開発すべき専用LSIの種類の数は、「表示付き電卓で6種類、プリンタ付き電卓で8種類」(嶋正利,2007c)であった。

しかしながらビジコンがインテルに依頼した新規開発すべき専用LSIの種類の数に関して、インテル側の証言は異なっている。インテルは、Intel(1998)、インテル(2001)、Intel(2006)などにおいて「ビジコン案は12種類の専用LSIを必要としていた」という趣旨の記述をおこなっている。またホフとインテルの創立者ノイス(Robert Noyce)との共同論文Noyce&Hoff(1981, p.9、p.11)、および、インテル社員による初期チップに関する歴史を調べた論文Volk et al. (2001,p.4)でも同様の記述がある。こうしたことからStanley(1987, p.158)、Aspray(1997a,p.10)、Allan (2001)、Berlin(2005,p.186)、Tedlow(2006,p.144) など多くのパソコン史関連の書籍、論文、Webページにおいて同様の記述が見られる<sup>(5)</sup>。

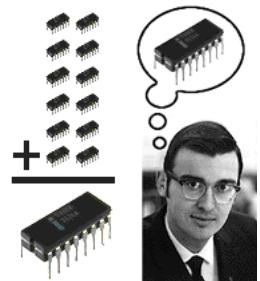
さらにまたインテルの創立者の一人で、当時副社長を務めていたムーア(Gordon E. Moore)は、ムーア (1995,pp.88-89)、Moore(1997)、Moore(2000,p.28)などにおいて、13種類であったとしている。

こうした食い違いに関して嶋正利は、「後年、インテルはビジコンが提案したLSIを12種類と述べたが、表示とプリンタ付き科学技術計算用電卓におけるLSIの使用個数であって種類ではなかった」(嶋正利, 2007c)としている。嶋正利だけでなく、1969年9月からビジコンのプロジェクトに加わったメザー(Stanley Mazor)も、Mazor,S.(1995,p.1601)において、8種類であったとしている。

なお1970年からビジコンのプロジェクトにLSI回路設計者として新たに加わったファジン(Federico Faggin)は、Faggin(2001)やFaggin(2009,p.12)において、プロジェクトに加わった最初の日に、「7種類の専用LSI」を必要としたビジコン案から、CPUを含めて「4種類のLSI」を用いるインテル案への移行に関する話をメザーから聞いた、と証言している。ファジンのこうした記述は、ファジン、ホフ、メザーと嶋の4人の共同論文Faggin et al. (1996,p.11) における「ビジコンは、ROMに記憶されたマクロ命令でプログラム可能な10進法コンピュータ --- 「プログラム制御」、「10進法の算術演算」、「タイミング回路」、「ROM」、「シフトレジスタ」、「プリンタ制御」、「出力ポート」という7種類の異なるLSIチップから構成されるコンピュータを提案していた」という記述とも合致している。

こうしたファジン、ホフ、メザー、嶋の共同論文に挙げられた7種類のLSIと、嶋正利(2007b)の表1におけるビジコンの第二次案の8種類の専用LSIとを比較すると、「プリンタ用バッファ」LSIが前者には抜けていることがわかる。この点に関しては技術的視点から判断して、ファジンおよび四者論文よりも、嶋正利の証言の方が正しいと思われる。

図10 ビジコン案は12種類の専用LSIであったとするインテルの図



[出典]Intel(1998)

このように証言の技術的詳細度や、4004の開発に対する証言者の関与度などから総合的に判断すると、12種類とするインテル側の証言や、13種類とするムーアの証言よりも、8種類とする嶋正利の証言の方が信頼できると思われる<sup>(6)</sup>。

#### (4) マイクロプロセッサー「発明」の漸進的性格 --- マイクロプロセッサーの技術論的定義の視点からの歴史的考察

ビジコン案における専用LSIの種類の数に関してムーアやインテルが実際よりも5割以上も多い値を挙げているのは、4004というマイクロプロセッサーの「発明」に関する自社側の主導権および関与度の強さを強調しようと意図に由来するものではないかと推測することができる。

しかしながら、トランジスタからICへ、ICからLSIへという回路集積度の向上、および、ハードワイヤードロジック方式からマイクロプログラミング方式への移行といった技術の歴史的発展構造の視点から見た場合には、プログラムで動作させる中央演算ユニットが表1のビジコン案にも表3のインテル案にも同じく存在することなどにも示されているように、ビジコン案とホフ案との間にかなりの連続性が存在することも事実である。

既存電卓の「ハードワイヤードロジックによる専用LSI」方式から「内蔵プログラム駆動による汎用LSI」方式への転換のための新規LSI開発というビジコンの技術戦略的意図や、「電卓の論理（ハードウェア回路網）をどう実現するか」という論理方式は、新機種が開発されるたびに、ランダム論理方式からプログラム論理方式へ、そしてコンピュータの低レベル言語による方式へと1段ずつ徐々に近づいて行きつつあった。・・・ホフの提案がまったく新しいものとは思えなかった」(嶋正利,1987,p.45)と嶋が考えたのは、「マイクロプロセッサーの使用によってハードウェアのさらなる単純化と汎用化を図る」というインテルのホフの案は「プログラミングによってハードウェアの簡略化を図る」というビジコンの技術戦略の延長線上にあるアイデアだったからである。

ホフの最初の提案には、タイミング用LSI、プリンタ制御用LSI、プリンタバッファ用LSIが残されており、すべての処理をマイクロプロセッサーに担わせるものではなかったことや、掛け算の処理に表索引を利用していること、提案された命令セットが原始的すぎることなど、いくつかの問題点を含むものであった(Faggin et al., 1997,p.7)。

以上の点から考えて、「マイクロプロセッサー開発に対してビジコンは開発の契機と資金を提供したに過ぎない」とするようなインテルの記述は正確とは言えない。

ここで問題となるのは、マイクロプロセッサーの技術論的定義、および、そうした定義を満たす製品としての4004に至るターニング・ポイントの歴史的分析である。

電卓の技術的構成に関して技術論的に言えば、工作機械に関する専用機と汎用機の対立と同

様の、専用LSIと汎用LSIという対立がマイクロプロセッサーの発明以前には存在した。マイクロプロセッサーの発明は、こうした専用LSIと汎用LSIというハードウェア次元における対立を、「LSI」というハードウェアとそれに内蔵するソフトウェアの組み合わせという方式、すなわち、「特定機種専用のソフトウェア・プログラムを内蔵した汎用LSI」としてのマイクロプロセッサーという技術的方式で乗り越えようとするものとして位置づけることができる。

作業や用途における特殊性に対しては特殊的プログラムによってソフトウェア的に対応し、基本的操作処理そのものは汎用的ハードウェアに対応しようという技術的発想は、パンチカードに打ち込まれた個々の製品ごとに異なる「プログラム」によって様々なパターンの模様を織る「汎用的機械」としての一九世紀のジャカード織機など以前から存在する発想である。

また「CPUに与えられた命令に1対1に直接的に対応する専用ハードウェア回路を用意するのではなく、CPUに与えられた命令をさらに基本的なマイクロ命令の組合せへとプログラム的に分解してから実行する方法」としてのマイクロプログラミング方式、すなわち、「マシンの最も基本的なレベルの動作を指定するマイクロ命令の集まりで書かれたプログラムであるマイクロプログラム（マイクロコード）を使用して、CPUのハードウェア的実装をより簡略化しようとする方法」としてのマイクロプログラミング方式といった技術的発想は、モーリス・ウィルクス(Maurice V. Wilkes)により1951年頃に着想されたものと言われており、メインフレームにおいて以前から使用されていた技法である。

「専用LSIで演算処理をする電卓から、マクロ命令レベルで組んだプログラムをROMに記憶させておいて新規開発のLSIで演算処理させる電卓へ」というビジコンの設計プランも、「マクロ命令ではなくマイクロ命令のレベルで組んだプログラムをROMに記憶させて4ビットCPUで演算処理させる電卓」というインテルのホフの案も、技術的にはこうしたマイクロプログラミング方式の技術的路線上にある。

たとえばムーアは、Leslie Berlinによって2004年7月1日に実施されたインタビューの中で、マイクロプロセッサーの発明に関して「[技術的な意味では] 本来の発明はまったくなかった。ブレークスルーは、いつかはできるようになるであろうと誰もが言ってきたことがついには可能になったということを認識したことにある。」(Berlin,2005,p.183)と語っている。

またStanleyも、「マイクロプロセッサーは、論理設計の進歩の結果としての自然的発展として必然的に生まれた」(Stanley,1987,p.158)としている。

さらにビジコン社長（当時）の小島義雄は、「記憶装置にたくわえたプログラムをマイクロコンピューターで処理し、インターフェイス回路を通じて情報の出し入れを行うというマイクロコンピューターのシステム」としての4004に関して特許出願を実際に検討したが、「LSIの技術も存在し、プログラムをたくわえておいて実行するという方式もコンピューターでは行われ

ていた」ことから、特許の取得を断念した（富田倫生,1996,第1部 第1章）というエピソードも、マイクロプロセッサーの「発明」のこうした漸進的な性格を示すものである。

## 2 4004の技術的性能

### a. 命令実行性能 0.06MIPS

4004において1命令の実行は最低限8つの基本クロックを使って実現するように設計されていた。すなわち「まず、最初の3クロックで、4ビット・アドレス／データパスを使用して、合計12ビットのアドレスをCPUからROMに送出する。次の2クロックで、8ビットの命令語をROMから4ビット・アドレス／データパスを通じてCPUに送る。最後の3クロックで、その命令語の命令機能そのものを実行する。」というように設計されていた<sup>(7)</sup>。

4004の最大動作周波数は750kHzであるが、インテルの推奨回路では5.185Mhzの水晶発振出力を7分割した740.7kHzのクロックを用いるようになっていた（藤広哲也,2002,p.214）。すなわちIntelの推奨回路による4004の動作周波数は約741 kHzである。4004が1命令を実行するのに必要な最小クロック数は8クロックであるから、最小の命令実行時間は $1 \div (741 \times 10^3 [1/s]) \times 8 = 10.8 \mu s$ となる<sup>(8)</sup>。

4004は、実際には8クロックまたは16クロックで1命令を実行した。4004における実際の計算処理過程において8クロックで実行される命令と16クロックで実行される命令の割合の平均値を1：1と仮定すると、命令実行に必要な平均クロック数は12となる。4004の最大動作周波数、すなわち最大クロック周波数は750KHzであるから、1秒間は最大で $750 \times 1000 = 75$ 万クロックとなる。それゆえ4004が1秒間に実行する命令数の平均値は最大で75万クロック÷12クロック=6万2500個になる。すなわち4004の基本的性能をMIPS (Million Instructions Per Second) 値で表現すると約0.06MIPSとなる（嶋正利,2007k）。

4004の約25年前の1946年に開発された世界最初期のコンピュータENIACは、18,000本の真空管を使用し、280立方メートルという巨大な容積のものであったが、加算速度0.2ms、乗算速度10桁×10桁で2.8ms、除算速度6msという程度の計算速度しかなかった。

4004で符号なしの16桁の加減算の演算を実行させた場合、いろいろの条件判断の実行時間まで含めた実行時間は約1.6msであった（嶋正利,1987,p.58）。4004は、約3 mm×約4 mm という小さなものであったが、ENIACと同様の計算処理能力を持っていたのである。なお掛け算や割り算は、加減算を利用したプログラムで実行された。

## b. 命令長、および、メモリ空間の大きさ

4004は4ビットCPUではあったが、その命令長は8ビットであり、46個の命令に対応したCPUであった。また4ビットCPUではあるが、メモリ・アドレスは3クロックを用いて4ビット×3=12ビットで指定するようになっていた(Faggin et al.,1972,p.2)(嶋正利,1987,p.61)ので、メモリ空間の大きさは $2^{12}$ バイト=4096バイト=4KBとなっていた。なお専用のメモリ・アドレス・バスはなく、汎用のデータ・バスを利用してメモリ・アドレスの指定が行われていた。

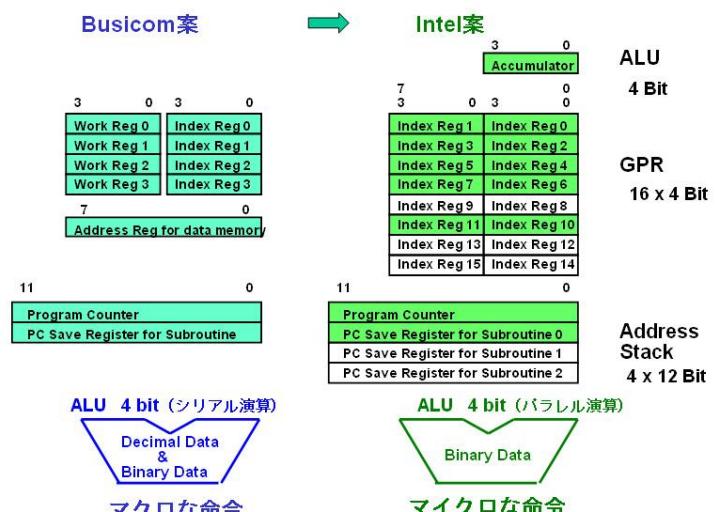
4004は、マルチプレクス・バス方式<sup>(9)</sup>の導入と、4001および4002のインテリジェント化により、インターフェース回路を使わなくても4001および4002をそれぞれ最大限16個まで直接に接続することができた。そのため、ROMは256byte/個×16個=4 KBまで、RAMは40byte/個×16個=640byteまで簡単に拡張することができた。さらにインターフェース回路を用意すれば、ROMおよびRAMを合計48個まで接続することができるようになっていた<sup>(10)</sup>。

## 3 マイクロプロセッサーという名称の由来

4004がマイクロプロセッサーと名付けられたのは、その大きさが約3mm×約4 mmという極めて小さく、ミニコンピュータよりも小さなコンピュータを製作可能とする素子であるという理由からではない。

嶋正利によれば、4004にマイクロプロセッサーという名称を付けたのは「電卓に使用したマクロ命令と比較して、より低い（コンピュータの機械語に近い）マイクロな命令を採用した」(嶋正利,1987,p.2)ことに由来

図11 「マクロ命令」方式から「マイクロ命令」への変更



[図の出典]嶋正利(2007d)

するものである。この場合のマイクロな命令とは、8086などのCPU内部のマイクロコードによるマイクロプログラミング方式のことではなく、「マクロ命令を使用した論理方式との違いを明確にするために、マイクロプログラム」とその当時呼んでいたものである(嶋正利,1995a,p.63)。

ビジコンの最初の案では図11のように「マクロ命令」を利用したALU(算術論理演算装置)を用いる設計であったのに対して、ホフのアイデアに基づき「マイクロ命令」を利用したALUへと設計変更したことに対応した名称であった。そのことは、4004を含むシステムMCS-4が「マ

イクロプログラミング可能な汎用的コンピュータ」(Faggin et al., 1972,p.1)と呼ばれていることも示されている。

マクロ命令を使ったプログラム論理方式の経験や蓄積がビジコンにあったことから、開発期間の制約があったにも関わらず、こうした変更が承認された(嶋正利,1987,p.53)。「マクロ命令」を利用することによって、「性能の低下はあるものの、ハードウェア論理回路網をプログラムで実現することが可能」(嶋正利,2007d)となった。

4004用に新規にプログラミング言語を開発する時間的=人員的余裕がなかったことから、プログラミングには機械語が利用された(嶋正利,1987,p.84)。「(電卓の演算動作に関わる)マクロ命令に相当するルーチンをマクロ命令で組むために400バイト、プリンター制御に150バイト、キーボード制御に150バイトほどが必要」という推定のもとにプログラミング作業が開始されたが、実際の総プログラム容量もROM1キロバイト内にうまく収められた(嶋正利,1987,p.63)。

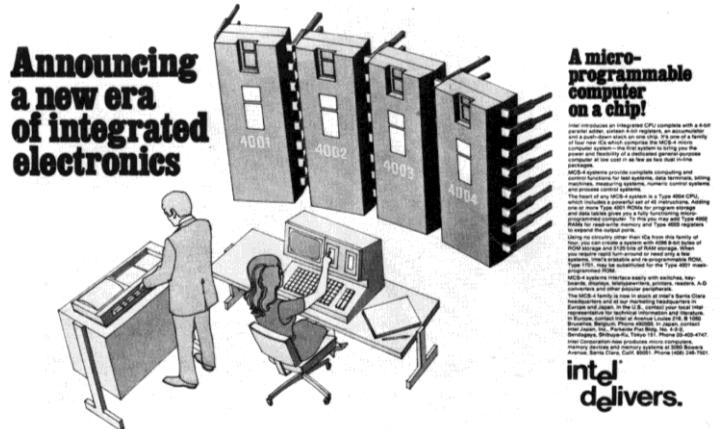
#### 4 システム性に配慮した製品開発 --- 製品番号が4004となった理由

インテルにおいて最初に開発されたマイクロプロセッサーに対して、4004という製品番号(型番)が付与されたのは、下記の二つの理由によるものと言われている。

a. インテルは、自社の製品に対して1000番台をDRAMに、2000番台をSRAMに、3000番台をバイボーラに割り当てるなど、4桁の型番を利用していた。新規開発のマイクロプロセッサーに対しても4桁の型番を割り当てるにしたが、4ビットCPUであったことから製品の型番としては4000番台を用いることになった。(嶋正利,1987,p.73)

b. マイクロプロセッサー単体では機能しないことから、インテルは、マイクロプロセッサーを動作させるのに必要なROM、RAM、シフトレジスタという三つの周辺チップも同時に開発した。インテルは、それら4つのチップを組み合わせることで、MCS-4という「LISチップによるマイクロコンピュータ・セット」、「マイクロプログラミング可能なコンピュータ・セット」として一般に売り出すことにしたが、その際に次表にあるようにROMの型番を

図12 MCS-4の発表当時の広告(1971)



[図の出典] Noyce and Hoff (1981) p.9

[原出所] Electronic News, November 15, 1971

4001、RAMの型番を4002、シフトレジスタの型番を4003とし、マイクロプロセッサーの型番を4004とした。

4004の完璧に動いたサンプルは1971年3月に完成していたが、その時点ではビジコンとの契約によりインテル社に外販の権利はなかった。ファジンが電卓用途以外にも4004が使えるとインテル社上層部に強く働きかけた結果として、インテル社は1971年6月から8月にかけてビジコンと交渉し「開発費の返却とLSIのより低価格での提供」を条件としてビジコンから4004の外販許可を得た。

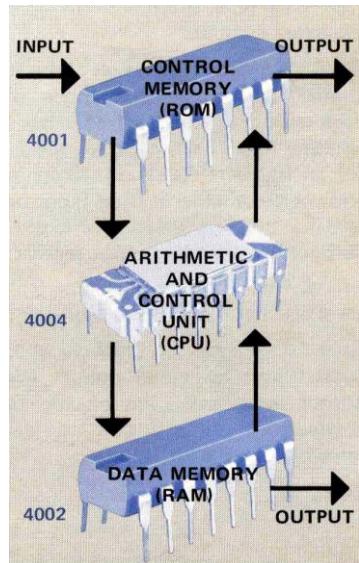
その際に上記理由のbに挙げたように、ROM、RAM、シフトレジスタという三つの周辺チップとマイクロプロセッサーを組み合わせてMCS-4というセット商品として販売開始することにし(嶋正利,1987,p.91)、1971年11月15日付の*Electronic News*で4001、4002、4003、4004という4つのLSIが一体となってプログラムで動作させることが可能なコンピュータとなること、すなわち、それら4つのLSIのシステム性を強調した図12のような広告宣伝がなされた。

表4 MCS-4の各コンポーネントの種類および完成年月

型番	種類	完成年月	備考
4001	ROM	1970年10月	プログラム保存用の読み出し専用メモリ。1個で256語（1語は8bit、したがって全体で8bit/語×256語=2048bit=256byte）の容量。4ビットのI/Oポート。
4002	RAM	1970年11月	データ保存用の読み書き可能なメモリ。1個で80語（1語は4bit、したがって全体で4bit/語×80語=320bit=40byte）の容量。
4003	シフトレジスタ	1970年10月	I/O拡張用LSI（10bitのシフトレジスタと出力ポートを組み合せたもの）。
4004	CPU	1971年3月	4ビット・マイクロプロセッサー、メモリ空間4KB

[注] 上記の完成月の数字は、嶋正利(1987)『マイクロコンピュータの誕生』岩波書店,p.87に基づくものである。

図13 4001、4002、4004の関連に関する図



[出典] Intel (1971), p.1

## 5 電卓とパソコンのバリュー・ネットワーク論的共通性 ---- 製造コスト低減を優先させた製品開発

4004で世界で最初に実現されたCPUのマイクロプロセッサー化は、CPUのサイズを縮小した単なるダウンサイジングではない。メインフレームやミニコンのCPUは、IBM360などに見られるように1960年代前半にはすでに32ビット化がなされていた。1960年代末の時点で、一度に処理できる情報量が4ビットのCPUを新規開発することの意味は、メインフレームやミニコンのメーカーにはなかった。0.06MIPS、メモリ空間4KBという、メインフレームやミニコンのCPUと比較して「極めて低性能」な製品である4004という4ビットCPUは、電卓や制御機器などの動作のためのCPUとしては有意味であるが、メインフレームやミニコンのためのCPUとしては無意味であった。さらにまた個人用のパソコンと異なり、CPUに対する大きさの制約がそれほどではないメインフレームやミニコンではCPUのサイズを小さくするという意味でのマイクロプロセッサー化も無意味であった。

こうしたことが意味するのは、4004というマイクロプロセッサーによるイノベーションはクリステンセンが言う意味での「破壊的イノベーション」だということである。メインフレームやミニコンとは異なるバリュー・ネットワークに属する製品が、4004というマイクロプロセッサーであった。

実際、世界初のマイクロプロセッサーの開発は、CPUの開発経験の豊富なメインフレーム・コンピュータ・メーカー・ミニコン・メーカーによってではなく、メモリを専業とするインテルと、電卓を主力商品の一つとするビジコンの技術者たちの共同によってなされた。分業が進んでいたその当時のメインフレーム・コンピュータ・メーカー・ミニコン・メーカーの技術者にはマイクロプロセッサーの開発は困難であった。嶋が「4004を実際に設計した人々は、それまでコンピュータの設計に携わっていた人ではありませんでした。マイクロプロセッサは、汎用の大型コンピュータをやっていた人には設計できなかっただでしょう。」(嶋正利,1989,p.49)と語っているように、マイクロプロセッサー開発に必要な技術的能力に関するバリュー・ネットワーク論的意味においてもメインフレームやミニコンの技術者たちにマイクロプロセッサーの開発は困難であった。

4004やMCS-4などの製品開発におけるような、最終的な製品の高性能化よりも製造コストの低減の方を優先した構成モジュール開発のあり方は、メインフレームやミニコンなど当時の既存コンピュータの開発スタイルと根本的に異なっている。メインフレームやミニコンなどのコンピュータと、パソコンでは、クリステンセンの言うバリュー・ネットワークが異なっている。メインフレームやミニコンなどのコンピュータでは、製品の高性能性という価値が最優先されるが、パソコンや電卓では低価格性という価値が最優先される。世界最初のマイクロプロセッ

サー4004の開発に際してもこうしたバリュー・ネットワークの違いが問題となつた。

マイクロプロセッサーとともにRAMやROMなどの周辺チップがシステムとして一緒に新規開発されることになったのは、メインフレーム・コンピュータやミニコンなど既存コンピュータ用の標準的なRAMやROMは製造単価が高かったからである。「この当時、市場に供給されつあった256ビットRAMは、メインフレーム・コンピュータに使用させようと開発されたため、非常に高価で、これを電卓に採用することはとても不可能であった」(嶋正利,1987,p.46)。

最終的な製品の製造コスト低減を目的としてLSIの新規開発を決めたビジコンにとって、「LSIのみでシステムを構築することをインテルに合意させることは、譲ることのできない最も高い優先順位」の事項であり、結果的にインテルとの交渉により「ROMとRAMをファミリーLSI製品にすることにより、価格を電卓向けにすることに成功した」(嶋正利,2007eおよびFaggin et al., 2007,p.7)のである。

ホフは、スタンフォード大学でIBM 1620やIBM 1130のためのプログラム作成やインターフェース回路制作に携わったり(Faggin et al.,1996,p.10)、DEC PDP-8を使用したり(Hoff et al.,2006,p.7)するなどの、コンピュータに関する長期間の経験を有していた。ホフのアイデアの基本は、そうした経験に基づくものであり、それらのマシンの技術的構成に由来するものであった。

IBM 1620は、電卓に関するビジコンの設計プランと同じく10進法コンピュータであった。そしてIBM 1620は、加算を実行する回路をハードウェア的には持たず、加算の実行に際してはあらかじめ記憶されている加算表を参照するようになっていた。ホフの最初のアイデアも、IBM 1620と同様のハードウェア構成を取ることでハードウェアの単純化を図り、4ビットCPUのトランジスタ数を2000以下に抑えて生産コストの低減を実現しようとするものであった。そのためホフの最初の提案には10進法演算回路も10進法演算を補助するいかななるハードウェアもまったくなく、表索引で10進法演算を処理しようとするものであった(嶋正利,1987,p.53)。

またホフはデータ・レジスタとしてもアキュムレータとしても、そしてアドレス・レジスタとしても使用可能な8個の多目的汎用レジスタを提案していたが、これはDECのPDP-8シリーズのアーキテクチャにヒントを得たものであった(嶋正利,1987,p.54)。またホフは、プログラム用にかなり大量のメモリを利用して高度に複雑な制御や演算機能を基本的なマイクロ命令の集まりによって実行するPDP-8のリーンなアーキテクチャ(lean architecture)と、複雑なマクロ命令をそれに対応する複雑なハードウェア回路で実行するビジコンの設計案との対照に打たれて、ビジコン案よりも大量のメモリを搭載することによって搭載LSIのトランジスタ数の削減など相対的な単純化を図った (Noyce&Hoff,1981,p.10)。

こうしたホフの設計プランは、既存コンピュータのバリュー・ネットワークに規定されたものであるとともに、インテルがそうした既存コンピュータ向けのメモリを主力商品としていた

ことも関係していたと思われる。電卓用CPUの4004の製品設計においてメインフレームやミニコンなどの場合と同様に「メモリを豊富に使う」というホフの方針は、既存コンピュータ向けのメモリを主力商品としていた当時のインテルの技術的資源の制約を考慮したものではあったが、製造コストの低減を必ずしも強く意識したものではなかった。4004の論理設計を嶋正利が担当することになったのも、インテル側のこうした技術的資源の制約を示している。

これに対して電卓会社に属する嶋正利は、入社後半年間ほど「三菱電機の電子計算機 MELCOM 3100を使用したアセンブラー、COBOL、FORTRANなどのプログラミング言語の教育」(嶋正利,2006b)を受けるなどメインフレーム・コンピュータの経験が少しあつたものの、大学の学部生時代には電動計算機を使用していただけであったし、「電卓の開発部門で働くようになってからは、1円でも安い材料を使うことや1円でも安くなるように論理や回路を設計することを目の当たりに見、かつ要求され、それが習慣づけられていた」(嶋正利,1987,p.54)ため、4004のメモリの使い方や命令セットの種類などでたびたびホフと衝突した。

最終的には**低価格性**を重視する立場から4004の製品開発がおこなわれることになった。アドレス指定方式としては非常に不便であったにも関わらず4004で「レジスタ間接アドレス指定方式」<sup>(11)</sup>を採用したのも、アドレス指定を命令の中に入れないことによってハードウェアの簡単化を実現することが目的であった(嶋正利,1987,p.58)。またROM(4001)とRAM(4002)のインテリジェント化は、「これらのチップにも多少の命令実行機能を持たせることによって、命令の実行時間を速くするだけでなく、CPU内の論理をより一層簡単化させ、総トランジスタ数を減少させる」(嶋正利,1987,p.60)ことを狙ったものであった。

4004は電卓用CPUとして、低価格性および汎用性の重視という設計思想のもとに開発されたのである。こうした設計思想は、4004を中心とする「マイクロ・コンピュータ・システム」MCS-4にも反映されている。開発者たちによるとMCS-4は、「ミニコンピュータと競争することを意図したものではなく、コンピュータの概念を拡張し、コストやサイズの最小化がきわめて重要であるが、スピードは重要な要素とはされないような新しい応用分野でのコンピュータ利用を意図した」(Faggin et al., 1972, p.1)ものであった。

こうした設計思想はパソコン用CPUとも共通している。パソコンと電卓における、**性能**よりも**低価格性**の重視というバリュー・ネットワーク論的共通性が、「電卓上がりのCPU」であるインテル系CPUがパソコン市場でドミナント・デザインの位置を獲得することに大きく寄与したのである。

## 引用図版の出典

- Altman , L. ed. (1976) *Large Scale Integration*, McGraw-Hill  
Barrett, Craig R. (1989) "Semiconductor manufacturing - the past and the future," *IEEE/SEMI International Semiconductor Manufacturing Science Symposium, 1989*. ISMSS,p.1  
Moore,G.E. (1975) "Progress In Digital Integrated Electronics," *Technical Digest 1975. International Electron Devices Meeting, IEEE, 1975*, pp. 11-13.

## 4004関連の参考文献案内

### a. 4004を含むシステム「MSC-4」に関する1972年の学会発表

Faggin, F.; Shima, M.; Hoff, M.E.; Feeney, H.; Mazor, S. (1972) "HE MCS-4 - An LSI micro computer system" *IEEE '72 Region Six Conference* ,pp.1-6 [*IEEE Solid-State Circuits Magazine*, Volume: 1 , Issue: 1 (2009) , pp.55 – 60に再録]

### b. 4004の最初の広告

*Electronic News*, November 15, 1971 [Noyce, R. and M. Hoff (1981) "A History of Microprocessor Development at Intel," *IEEE Micro*, Vol.1, No.1, p.9に再録されている。]

### c. 4004関連のインテル社資料

#### <4004関連マニュアル等>

Intel (1971) *MCS-4 Micro Computer Set Data Sheet, 1971*,  
[http://www.bitsavers.org/pdf/intel/MCS4/MCS4\\_Data\\_Sheet\\_Nov71.pdf](http://www.bitsavers.org/pdf/intel/MCS4/MCS4_Data_Sheet_Nov71.pdf)  
Intel (1973) *MCS-4 Micro Computer Set Users Manual*, February 1973,  
<http://download.intel.com/museum/archives/pdf/msc4.pdf>  
Intel (1987) *4004 Data Sheet*  
[http://download.intel.com/museum/archives/pdf/4004\\_datasheet.pdf](http://download.intel.com/museum/archives/pdf/4004_datasheet.pdf)

#### <歴史関連>

Intel(1998) "Interact with History"  
[http://web.archive.org/web/19980115151820/http://www.intel.com/intel/museum/25anniv/iwh/iwh\\_main.htm](http://web.archive.org/web/19980115151820/http://www.intel.com/intel/museum/25anniv/iwh/iwh_main.htm)

12種類のLSIというインテルの主張に関しては、特に下記が参考になる。  
[http://web.archive.org/web/20000304154538/www.intel.com/intel/museum/25anniv/iwh/iwh\\_q7.htm](http://web.archive.org/web/20000304154538/www.intel.com/intel/museum/25anniv/iwh/iwh_q7.htm)  
<http://web.archive.org/web/20000301063901/www.intel.com/intel/museum/25anniv/iwh/iwhq7a.htm>  
インテル(2001)「世界初のマイクロプロセッサ「4004」誕生から30年 ~ 今後も進化しつづけるマイクロプロセッサ」2001年11月15日付けインテル プレスリリース  
<http://www.intel.co.jp/jp/intel/pr/press2001/011115a.htm>  
Intel(2006) "Intel's First Microprocessor—the Intel® 4004"  
<http://www.intel.com/museum/archives/4004.htm>

#### d. 4004の歴史関連のその他資料

Allan,Roy A. (2001) *A History of the Personal Computer*, Allan Publishingの中のChapter3の1.Intelの節 (<http://www.retrocomputing.net/info/allan/eBook00.pdf> ≈ <http://www.retrocomputing.net/info/allan/> より全文ダウンロードが可能)

Aspray, W. (1997a) "The Intel 4004 Microprocessor: What Constituted Invention?", *IEEE Annals of the History of Computing*, Vol. 19, No. 3, 1997, pp.4-15

([http://ar.aichi-u.ac.jp/lecture/infosys/history/INTEL\\_4004\\_Microprocessor.pdf](http://ar.aichi-u.ac.jp/lecture/infosys/history/INTEL_4004_Microprocessor.pdf)よりダウンロード可能)

Aspray, W. (1997b) "The Social Construction of the Microprocessor: A Japanese and American Story," In Andrew Goldstein and William Aspray (eds.) *Facets: New Perspectives on the History of Semiconductors*, IEEE Press, 1997., pp.215-267.([http://www.ieeeghn.org/wiki/images/f/fd/Aspray,\\_1997.pdf](http://www.ieeeghn.org/wiki/images/f/fd/Aspray,_1997.pdf)よりダウンロード可能)

Berlin, Leslie(2005) *The man behind the microchip: Robert Noyce and the invention of Silicon Valley*, Oxford U.P. の第8章「Takeoff」の中のpp.183-188

Bisset,S., Faggin,F., Feeney,H., Gelbach,Ed, Hoff,T., Mazor,S., Shima,M. (2007) "Oral History Panel on the Development and Promotion of the Intel 8080 Microprocessor", Recorded: April 26, 2007, Computer History Museum,[http://archive.computerhistory.org/resources/access/text/Oral\\_History/102658123.05.01.acc.pdf](http://archive.computerhistory.org/resources/access/text/Oral_History/102658123.05.01.acc.pdf)

Cassell, J. (1999) "Who Really Invented The Microprocessor?"

[http://www.ebnonline.com/25year/25\\_microprocessors2.html](http://www.ebnonline.com/25year/25_microprocessors2.html)

Faggin, F., Shima, M., Hoff, M.E., Feeny, H., Mazor, S. (1972) "The MCS-4 – An LSI Micro Computer System," *Proceedings of the IEEE '72 Region Six Conference*, pp.1-6. (*IEEE Solid-State Circuits Magazine*, Winter 2009, pp.55-60に再録)

Faggin, F. (1992) "The Birth of the Microprocessor", *Byte*, March 1992, pp145-150

Faggin, F. Hoff,T., Mazor, S., Shima, M. (1996) "The History of the 4004", *IEEE Micro*, December 1996, pp10-20

Faggin et al.(1997)「日本の電卓が生んだ世界初のマイクロプロセッサ」『日経エレクトロニクス』No.683, p.163

Faggin,F.(2001) "The Birth of the Microprocessor - My Recollections," Invited paper presented at the Microprocessor Forum San Jose, CA, October 15, 2001, <http://www.intel4004.com/speech.htm>

Faggin,F., Feeney,H., Hoff,T., Mazor,S., Shima,M. (2007) "Oral History Panel on the Development and Promotion of the Intel 4004 Microprocessor" Recorded: April 25, 2007, Computer History Museum, [http://archive.computerhistory.org/resources/access/text/Oral\\_History/102658187.05.01.acc.pdf](http://archive.computerhistory.org/resources/access/text/Oral_History/102658187.05.01.acc.pdf)

Faggin, F.(2009) "The Making of the First Microprocessor," *IEEE Solid-State Circuits Magazine*, Vol.1 , Issue 1, pp.8-21

Hoff,T., Mazor,S. (2006) "Ted Hoff and Stan Mazor on their contributions to the Intel 4004," CHM Reference number: X3774.2006, Computer History Museum

[http://archive.computerhistory.org/resources/text/Oral\\_History/Intel\\_4004/Intel\\_4004\\_1.oral\\_history.2006.1.02657974.pdf](http://archive.computerhistory.org/resources/text/Oral_History/Intel_4004/Intel_4004_1.oral_history.2006.1.02657974.pdf)

Ted HoffおよびStan Mazorを対象としたDavid Lawsによる2006年9月20日のインタビュー。本インタビューでは他の著作における証言とは異なりHoffも、“I think there were going to be something like ten or

**twelve different chips** by the time the family was done.”というように、ビジコンの提案は10種類または12種類のチップであったと述べている。

Mazor,S.(1995) “The History of the Microcomputer-Invention and Evolution”, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 83, No. 12, December 1995,pp.1601-1608

Moore, Gordon E. (1997) "Part 1: The Birth of the Microprocessor," (Interview), ScientificAmerican.com, September 22, 1997, <http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=gordon-e-moore---part-1>

本インタビューでMooreは、“GM: They had done all the design work on those. We had a small engineering group, and most of the people were up to their eyeballs in memory circuits, so we didn't have a lot of engineering to put on something like this. To do **13 different complex custom circuits** was far beyond what we could tackle.”というように、ビジコンの提案は13種類のチップであったと述べている。

Moore, Gordon E. (2000) "GORDON MOORE ORAL HISTORY", Computerworld Information Technology Foundation

Noyce, R., Hoff, M. (1981) "A History of Microprocessor Development at Intel," *IEEE Micro*, Vol.1, No.1, pp.8-21

Stanley, Robert C.(1987) “Architecture of Microprocessors” in Kent, A., Williams, James G., Holzman, Albert G. eds. (1987) *Encyclopedia of computer science and technology*, Marcel Dekker Inc.,pp.140-177のAPPENDIX 1: EVOLUTION(pp.157-160)

Robertson, L. (2005) "Anecdotes," *IEEE Annals of the History of Computing archive*, Volume 27 , Issue 2 (April 2005) ,pp.82-84

Tedlow, Richard S. (2006) *Andy Grove: The Life and Times of an American*, Portfolio

Volk, Andrew M., Stoll, Peter A., Metrovich, P. (2001) “Recollections of Early Chip Development at Intel,” *Intel Technology Journal*, Q1, 2001

ムーア(取材／構成:玉置直司,1995)『インテルとともに --- ゴードン・ムーア 私の半導体人生』日本経済新聞社

奥田耕士(2000)『傳田信行 インテルがまだ小さかった頃』日刊工業新聞社

関口和一(1999a)「マイコン誕生(1) 小さな電器店での出会い」『日本経済新聞』1999年5月31日夕刊

関口和一(1999b)「マイコン誕生(2) 日本人が開発したMPU」『日本経済新聞』1999年6月1日夕刊

関口和一(1999c)「マイコン誕生(3) インテルからの電話」『日本経済新聞』1999年6月2日夕刊

関口和一(1999d)「マイコン誕生(4) 「部品」がヒット作に」『日本経済新聞』1999年6月3日夕刊

関口和一(1999e)「マイコン誕生(5) 紹密な日本人」『日本経済新聞』1999年6月4日夕刊

富田倫生(1994)『パソコン創世記』TBSブリタニカ

富田倫生(1996)『エキスピンドブック版 パソコン創世記』

<http://attic.neophilia.co.jp/aozora/htmlban/gopc.html>

藤広哲也(2002)『CPUは何をしているのか』すばる舎

#### e. マイクロプロセッサー開発に関連した嶋正利の著作

嶋正利・鎌田信夫(1975)「マイクロコンピュータ・アーキテクチャの諸問題〈第1部〉 --- 第1世代マイクロコンピュータ“4004から8008へ”」『トランジスタ技術別冊 インターフェース』1975年3月号、pp.47-62

嶋正利・鎌田信夫(1975)「マイクロコンピュータ・アーキテクチャの諸問題〈第2部〉 --- 第2世代マイクロコンピュータ8080へ」『トランジスタ技術別冊 インターフェース』1975年6月号、pp.p.14-29

嶋正利(1981)「マイクロコンピュータの誕生と発展」『エレクトロニクス・イノベーションズ』(日経エレクトロニクス・ブックス)日経マグロウヒル社、pp.159-185

嶋正利(1987)『マイクロコンピュータの誕生 --- わが青春の4004』岩波書店

嶋正利(1989)「マイクロプロセッサの誕生からパソコンまで」SE編集部編『僕らのパソコン10年史』翔泳社,1989年所収,pp.48-61

嶋正利(1993)「マイクロプロセッサの発展と将来」『情報処理』Vol.34, No.2, pp.135 – 141 (Feb.1993)

嶋正利(1994) “Masatoshi Shima, Electrical Engineer, an oral history conducted in 1994 by William Aspray, IEEE History Center, Rutgers University, New Brunswick, NJ, USA,[ W.Asprayによって1994年5月17日になされた嶋正利に対するインタビューの記録]

[http://web.archive.org/web/20000916113341/http://www.ieee.org/organizations/history\\_center/oral\\_histories/transcripts/shima.html](http://web.archive.org/web/20000916113341/http://www.ieee.org/organizations/history_center/oral_histories/transcripts/shima.html) 嶋正利(1995a)『次世代マイクロプロセッサ ;マルチメディア革命をもたらす驚異のチップ』日本経済新聞社

CPUの開発に関連しては本書の第1章第1節「マイクロプロセッサの発明」、第2章「マイクロプロセッサはどのようにうまれたのか」が特に興味深い。

嶋正利・坂村健(1995b)「[対談]マイクロプロセッサの過去、現在、未来 --- 対談 嶋正利vs坂村健」『TRONWARE』Vol.34(1995年8月号),パーソナルメディア

嶋正利・坂村健(1997)「[対談/巻頭特別インタビュー]日本は世界に通用するMPUをつくれるか」『TECH B-ing』1997年7月号,pp.77-81

嶋正利(1998)「マイクロプロセッサの開発」[畠田耕一・宮西正宜編(1998.3)『科学技術と人間のかかわり』大阪大学出版会所収]

嶋正利(1999)「マイクロプロセッサの25年」『電子情報通信学会誌』Vol.82 No.10, pp.997-1017

<http://www.ieice.org/jpn/books/kaishikiji/199910/19991001.html>

嶋正利(2002)「技術開発と教育」『インターフェース』2002年6月号

[http://www.cqpub.co.jp/interface/toku/2002/200206/toku1\\_1.htm](http://www.cqpub.co.jp/interface/toku/2002/200206/toku1_1.htm)

嶋正利・栗林正雄(2003)「[対談]SOC(システム・オン・チップ)時代の創造的開発」『OLYMPUS TECHNO ZONE』Vol.58(2003),pp.2-9

<http://www.olympus.co.jp/jp/magazine/techzone/vol58/index.cfm>

嶋正利(2006a)「「マイクロプロセッサ4004の開発は破壊的イノベーションであった」『嶋正利のプロセッサ温故知新』日経BP社、ITpro > プラットフォーム

2006.11.15,<http://itpro.nikkeibp.co.jp/article/Watcher/20061115/253708/>

嶋正利(2006b)「世界初のCPU「4004」開発回顧録(1) それは電卓の価格競争から始まった」日経BP社、ITpro > プラットフォーム > 仮想化

<http://itpro.nikkeibp.co.jp/article/Watcher/20061219/257298/>

嶋正利(2007a)「世界初のCPU「4004」開発回顧録(2) --- プログラム論理方式を採用したプリンタ付きIC電卓の開発に成功」『嶋正利のプロセッサ温故知新』日経BP社、ITpro > プラットフォーム、2007/04/10

<http://itpro.nikkeibp.co.jp/article/Watcher/20070329/266802/>

嶋正利(2007b)「世界初のCPU「4004」開発回顧録(3) --- 電卓にも使える汎用LSIのアーキテクチャを決定」

『嶋正利のプロセッサ温故知新』日経BP社、ITpro>プラットフォーム、2007/04/18

<http://itpro.nikkeibp.co.jp/article/Watcher/20070418/268717/>

嶋正利(2007c)「世界初のCPU「4004」開発回顧録(4) --- インテルと交渉開始するも、2カ月で暗礁に」『嶋正利のプロセッサ温故知新』日経BP社、ITpro>プラットフォーム、2007/04/26

<http://itpro.nikkeibp.co.jp/article/Watcher/20070418/268753/>

嶋正利(2007d)「世界初のCPU「4004」開発回顧録(5) --- 世界初のマイクロプロセッサ4004の産声」『嶋正利のプロセッサ温故知新』日経BP社、ITpro>プラットフォーム、2007/05/08

<http://itpro.nikkeibp.co.jp/article/Watcher/20070424/269342/>

嶋正利(2007e)「世界初のCPU「4004」開発回顧録(6) --- 本当の開発の仕事と交渉が始まった」『嶋正利のプロセッサ温故知新』日経BP社、ITpro>プラットフォーム、2007/05/10

<http://itpro.nikkeibp.co.jp/article/Watcher/20070424/269363/>

嶋正利(2007f)「世界初のCPU「4004」開発回顧録(7) --- 守勢から攻勢へ」『嶋正利のプロセッサ温故知新』日経BP社、ITpro>プラットフォーム、2007/05/15

<http://itpro.nikkeibp.co.jp/article/Watcher/20070511/270743/>

嶋正利(2007g)「世界初のCPU「4004」開発回顧録(8) --- 仕様の最終検討と、図入り製品機能仕様書と製品設計計画案の作成、そして帰国」『嶋正利のプロセッサ温故知新』日経BP社、ITpro>プラットフォーム、2007/06/05

<http://itpro.nikkeibp.co.jp/article/Watcher/20070531/273097/>

嶋正利(2007h)「世界初のCPU「4004」開発回顧録(9) --- 発注者がCPU「4004」の論理設計の担当者となった」『嶋正利のプロセッサ温故知新』日経BP社、ITpro>プラットフォーム

2007/06/07,<http://itpro.nikkeibp.co.jp/article/Watcher/20070531/273103/>

嶋正利(2007i)「世界初のCPU「4004」開発回顧録(10) --- CPU「4004」の詳細な論理設計を開始」『嶋正利のプロセッサ温故知新』日経BP社、ITpro>プラットフォーム、2007/06/12

<http://itpro.nikkeibp.co.jp/article/Watcher/20070531/273109/>

嶋正利(2007j)「世界初のCPU「4004」開発回顧録(11) --- CPU「4004」の設計終了」『嶋正利のプロセッサ温故知新』日経BP社、ITpro>プラットフォーム、2007/06/19

<http://itpro.nikkeibp.co.jp/article/Watcher/20070531/273121/>

嶋正利(2007k)「世界初のCPU「4004」開発回顧録(12) --- CPU「4004」チップの完成」『嶋正利のプロセッサ温故知新』日経BP社、ITpro>プラットフォーム、2007/07/10

<http://itpro.nikkeibp.co.jp/article/Watcher/20070702/276465/>

嶋正利(2007l)「世界初のCPU「4004」開発回顧録(13) --- CPU「4004」を使ったプリンタ付き電卓の開発」『嶋正利のプロセッサ温故知新』日経BP社、ITpro>プラットフォーム、2007/07/17

<http://itpro.nikkeibp.co.jp/article/Watcher/20070702/276468/>

嶋正利(2007m)「世界初のCPU「4004」開発回顧録(14) --- CPU「4004」を使ったプリンタ付き電卓の開発終了」『嶋正利のプロセッサ温故知新』日経BP社、ITpro>プラットフォーム、2007/07/24

<http://itpro.nikkeibp.co.jp/article/Watcher/20070713/277480/>

嶋正利(2007n)「世界初のCPU「4004」開発回顧録(15) --- 連載のおわりにあたって、そして8080開発への旅立ち」『嶋正利のプロセッサ温故知新』日経BP社、ITpro>プラットフォーム、2007/07/31

<http://itpro.nikkeibp.co.jp/article/Watcher/20070713/277451/>

嶋正利(2007o)「Video Oral History of Microprocessor at Computer History Museum (1) --- CPU「4004」の詳細な論理設計を開始」『嶋正利のプロセッサ温故知新』日経BP社、ITpro>プラットフォーム、2007/06/26

<http://itpro.nikkeibp.co.jp/article/Watcher/20070615/274907/>

嶋正利(2007p)「Video Oral History of Microprocessor at Computer History Museum (2)」『嶋正利のプロセッサ温故知新』日経BP社、ITpro>プラットフォーム、2007/07/04

<http://itpro.nikkeibp.co.jp/article/Watcher/20070702/276451/>

Shima, M.(1978) "Two Versions of 16 - Bit Chip S - pan Microprocessor, Minicomputer Needs," *Electronics*, Dec 21.1978, pp.81-88

Shima, M.(2005) "The Birth, Evolution and Future of the Microprocessor," *The Fifth International Conference on Computer and Information Technology 2005*, p.2

Shima, M.(2009) "The 4004 CPU of my youth," *IEEE Solid-State Circuits Magazine*, Vol.1 , Issue 1, pp.39-45

#### f. 嶋 正利の略歴などに関する参考資料

稻森財団(2005)「1997年の第13回京都賞（先端技術部門）受賞者 プロフィール」、  
[http://www.inamori-f.or.jp/laureates/k13\\_a\\_masatoshi/prf.html](http://www.inamori-f.or.jp/laureates/k13_a_masatoshi/prf.html)

遠藤諭(1996)「世界初のマイクロプロセッサ4004を作った男 嶋正利」『計算機屋かく戦えり』ASCII社,pp.425-441

#### g. ビジコン社関連資料

ビジコン,インテル(1970)「ビジコンとインテルとの契約書」

<http://web.archive.org/web/20001027144507/http://www.busicom-corp.com/intel1.html> または

[http://download.intel.com/museum/research/arc\\_collect/history\\_docs/pdf/busicomandintel\\_agreement.pdf](http://download.intel.com/museum/research/arc_collect/history_docs/pdf/busicomandintel_agreement.pdf)

大崎眞一郎(2003)「ビジコン社の歴史」電卓博物館

<http://www.dentaku-museum.com/1-exb/special/history/busicom-history/busicom-history.html> [ビジコン社の小島義雄社長(当時)へのインタビューに基づく記事]

電卓博物館(2004)「ビジコン デスクトップ電卓」、

<http://www.dentaku-museum.com/calc/calculator/busicomd/busicomd.html>

電卓博物館(2004)「マイクロプロセッサ 4004 (インテル)」、

<http://www.dentaku-museum.com/hc/computer/intel4004/intel4004.html>

並川宏彦(1989)「日本計算器(株)の計算機製造のあゆみ」『大阪の産業記念物』第11号,1989年3月

## 【注】

- 
- (1) 嶋正利(2007n)に4004シリーズLSIを使ってビジコンが開発したNCR向けキャッシュレジスタの写真（図8）が掲載されている。ただしビジコンは経営状況の悪化からこうしたレジスターの販売には至ってはいない。インテルの傳田信行の回想(奥田耕士,2000,p.90)によれば、4004を搭載した世界初の電子式レジスターは、NCRではなく、テックから販売開始されている。テックは4004の登場直後の1972年の初め頃に4004の採用についての最初のコンタクトをインテル側におこなっている。そしてテックは4004を搭載した電子レジスターの開発をおこない、「1973年か74年の2月か3月に」その製品に対する初の受注に成功している(奥田耕士, 2000, pp.90-91)。
- このことにも示されているように組込用マイクロプロセッサーとして4004が利用可能なことを認識していた人々は、4004の開発期からかなり多くいたと考えられる。
- (2) 同様の表は、嶋正利(1987) p.38にもあるが、その表にはプリンタ制御用LSIが掲載されていない。
- (3) 垂井康夫(2003)「日本の半導体技術とコンピュータ」『情報処理』第44巻1号,p.72によれば、「ロックウェルがつくったLSIは200万個で、シャープがロックウェルに払った代金が108億円、1台の電卓にチップが5個だから合計で27,000円」であった。1ドル=360円で換算すると、LSIの部品代は75ドルとなる。
- (4) 実際4004のトランジスタ数は、インテルの最初の試算では約1,900であったが、実際には約2,300と増加している。
- (5) ホフ、Andy Grove、ムーアも含め多数のインテル関係者に対するインタビューおよび数多くの文献に基づいて書かれたノイスの伝記Berlin(2005,p.187)では、「ビジコンの設計プランは、インテル案の2倍のコストがかかり、約2,000個のトランジスタからなるLSIを12から15種類必要とする」と書かれている。
- (6) こうした評価に際しては、詳しくは注(8)で論じた4004の動作周波数に関するインテルの公式発表資料における誤りや、インテルのWebサイトにおける4004に対する嶋正利の関与を無視した記載など、4004をめぐるインテルの発表には正確性に欠ける点があることも考慮した。
- (7) このことに関しては、Faggin et al.(1972)p.2のFigure 2および嶋正利(1987),p.62の図21が参考になる。
- (8) インテル(2001)「世界初のマイクロプロセッサ「4004」誕生から30年」2001年11月5日付けインテル社プレスリリース、Intel(2007) “60 YEARS OF THE TRANSISTOR: 1947–2007”、Intel(2010) “Intel Microprocessor Quick Reference Guide - Product Family”, <http://www.intel.com/pressroom/kits/quickrefam.htm>など、インテル社の公表資料では4004の動作周波数が108KHzとされている。
- MCS-4に関するインテルの1971年のデータシート Intel(1971,p.3)、MCS-4に関するインテルの1973年のマニュアル Intel(1973,p.6)、Faggin et al.(1972,p.2)、4004の開発者の嶋の記載(嶋正利,1987,p.58)などが示しているように、4004の動作周波数を108KHzとするこうしたインテル社の資料は誤りである。こうした誤りは、4004に対するインテルの推奨回路で動作させた場合の最短命令実行時間 $10.8\mu s$ に由来するものであると思われる。「マイクロプロセッサの歴史」『インターフェース』2003年10月号(<http://www.cqpub.co.jp/interface/toku/2003/200310/toku2.htm>に再録)も「4004のニュースリリースで命令の実行速度が $10.8\mu s$ となっていたのを勘違いした」ことに由来する誤りとしている。
- (9) 時分割方式により、一つのバスをアドレス・バスおよびデータ・バスとして共有する方式
- (10) この記述は、*Electronic News*, November 15, 1971に掲載された4004に関するインテルの広告(Noyce and Hoff (1981) p.9および嶋正利,1987,p.viの図1などに再録)、および、4004の最初のカタログIntel(1971) p.1(嶋正利,1987,p.3の図4に再録)に基づくものである。
- (11) 個々の命令においてアドレスを直接的に指定するのではなく、汎用レジスタで指定されたアドレスをRAMやROMのアドレス・レジスタに特別な命令により送っておき、次に別な命令でRAMやROMからのデータの読み込みや書き込みを実行すること(嶋正利,1987,p.58)。