

世界最初のマイクロプロセッサ Intel 4004

明治大学経営学部

佐野正博

(初版2004年、改訂2010年)

目 次

(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
a. 「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	1
b. 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開発への取り組み開始	2
c. 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	5
d. マイクロプロセッサ「発明」の漸進的性格 --- マイクロプロセッサの技術論的定義の視点からの歴史的考察	6
(2) 4004 の技術的性能	8
a. 命令実行性能 --- 0.06MIPS	8
b. 命令長、および、メモリ空間の大きさ	9
(3) マイクロプロセッサという名称の由来	9
(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	10
(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	12
(6) 参考文献	15
a. 4004 を含むシステム「MSC-4」に関する 1972 年の学会発表	15
b. 4004 の最初の広告 --- <i>Electronic News</i> , November 15, 1971 の再録先	15
c. 4004 関連のインテル社資料	15
d. 4004 の歴史関連のその他資料	15
e. 嶋 正利(しま まさと)氏の略歴に関しては下記の Web ページや論文が参考となる。	17
f. マイクロプロセッサ開発に関連した嶋正利氏の自身の著作としては下記がある。	17
g. 嶋正利氏関連著作	20
h. ビジコン社関連資料	20

(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

a. 「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る。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) とするとともに、「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する」ことを基本としていた(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 開発の依頼もこうした視点から理解する必要がある。

ビジコンが電卓事業も手がけるようになった契機は、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ている。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。この機種は、メモリ機能を持ち、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、シャープの QT-8D も含め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は、「キーボード／表示」用 LSI、「アドレス制御」用 LSI、「小数点制御」用 LSI、「計算ユニット」用 LSI 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、「柔軟性が全くなく、電卓の機能を変更しようとするとき全ての 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。

シャープのように同一機種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ことはできたが、高級電卓を主力とし同一機種の生産量が少ないビジコンには不向きな

方式であった。

ビジコンは、その当時いくつかの企業へ電卓の 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、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意図した(嶋正利,1987,p.16 および嶋正利,2006b)。ビジコンは、高級電卓のコストダウンのために、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 を開発することとした。

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)。

モステックにはワンチップ用電卓のための LSI 開発を委託し、1970 年 6 月 16 日に契約を結んでいる。「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、こうしたワンチップ方式のための LSI の開発はモステックに委託したのである。これに対してインテルには上述のように「ROM オリエンテッドな計算機」すなわち「ソフトウェア・オリエンテッドな計算機」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ラー化することにより多様な機種で利用可能な汎用的製品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。

b. 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開発への取り組み開始

ビジコンは、そ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ルディング・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、「計算機能のほかには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)の嶋正利らはそ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)⁽¹⁾。

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の電卓は高性能・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2 シャープ電卓用LSI

機能	トランジスタ数
	633
	740
	900
	940
タイミング	240
総計	3,453

[出典]嶋正利(1987)p.38

世界初のMOS LSIを使用した電卓であるシャープのQT-8Dは、表2に示したように「キーボード/表示回路」用LSI、「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、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⁽²⁾。

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。

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)」

(1) 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。

(2) 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」であったと言われている。1ドル=360円で換算すると、LSIの部品代は75ドルとなる。

そ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 を作っ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。

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 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。

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	17,000	270	合計	17,100	195

[出典]嶋正利(1987)p.51の表3を基に一部修正。

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⁽³⁾、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

(3) 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。

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が「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」ということから、ホフ案の採用に賛成したのである。

c. 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。

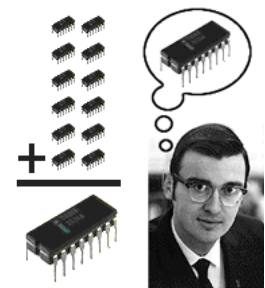
しかしながらビジコンがインテルに依頼した新規開発すべき専用 LSI の種類の数に関して、インテル側の証言は異なっている。インテルは、Intel(1998)、インテル(2001)、Intel(2006)などにおいて「ビジコン案は12 種類の専用 LSI を必要としていた」という趣旨の記述をおこなっている。またホフとインテルの創立者ノイス(Robert Noyce)との共同論文Noyce&Hoff(1981, p.9、p.11)、および、インテル社員による初期チップに関する歴史を調べた論文Volk et al. (2001,p.4)でも同様の記述がある。こうしたことからStanley(1987,p.158)、Aspray(1997a,p.10)、Allan (2001)、Berlin(2005,p.186)、Tedlow(2006,p.14 4) 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⁽⁴⁾。

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Mazor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

図1 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)

(4) 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。

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」(Busicom had proposed a ROM-based, macro instruction programmable decimal computer consisting of seven different LSI chips: program control, decimal arithmetic unit, timing logic, ROM, shift register, printer control, and output ports) 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。

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⁽⁵⁾。

d. マイクロプロセッサ「発明」の漸進的性格 --- マイクロプロセッサ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 段階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開発に対してビジコンは開発の契機と資金を提供し

(5) こうした評価に際しては、詳しくは注(7)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。

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・ポイントの歴史的な分析である。

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の発明以前には存在した。マイクロプロセッサの発明は、そうした専用 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なプログラムによってソフトウェア的に対応し、基本的な操作処理そのものは汎用の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 19 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「命令の実行、解釈などを専用の論理回路で行う代りに、一連の基本的命令（マイクロ命令）の組合せに分解し、プログラマ的に実行する方法」（『広辞苑 第六版』）としてのマイクロプログラミング方式、および、「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 のハードウェアの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、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に認識したことにある。(There was no real invention [in a technical sense]. The breakthrough was a recognition that it was finally possible to do what everyone had been saying we would some day be able to do.)」(Berlin, 2005, p.183)と語っている。

また Stanley も、「マイクロプロセッサは、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(The microprocessor was therefore born out of necessity as a natural development in the progression of logic design)」(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⁽⁶⁾。

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⁽⁷⁾。

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 $75 \text{ 万クロック} \div 12 \text{ クロック} = 6 \text{ 万 } 2500$ 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。

(6) 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。

(7) 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/quickreffam.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 μs 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 μs 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。

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⁽⁸⁾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⁽⁹⁾。

(3) マイクロプロセッサという名称の由来

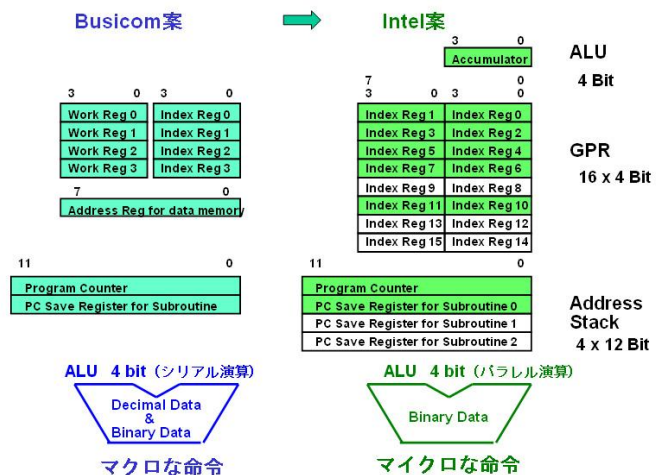
4004 がマイクロプロセッサと名付けられたのは、その大きさが約 3 mm×約 4 mm という極めて小さく、ミニコンピュータよりも小さなコンピュータを製作可能とする素子であるという理由からではない。

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 2 のように「マクロ命令」を利用した

ALU(Arithmetic and Logic Unit、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が可能な汎用的コンピュータ(general purpose microprogrammable computer)」(Faggin et al,1972,p.1)と呼ばれていることにも示されている。

図2 「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(2007)「世界初の CPU「4004」開発回顧録(5)」日経 ITpro, <http://itpro.nikkeibp.co.jp/article/Watcher/20070424/269342/>

(8) 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

(9) 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atalog 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。

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)。「マイクロ命令」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。

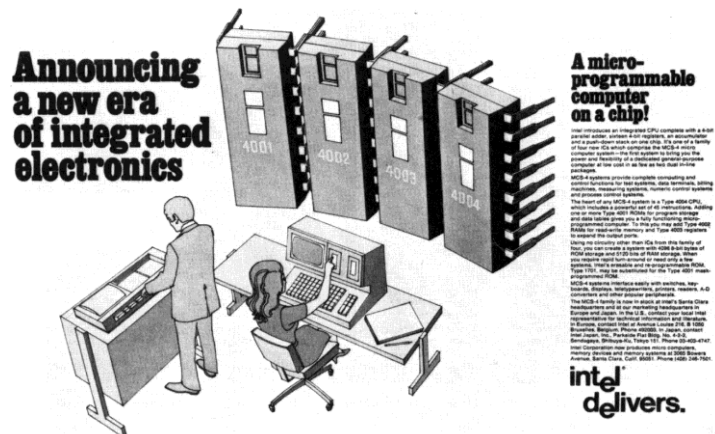
4004 用に新規にプログラミング言語を開発する時間的＝人力的余裕がなかったことから、プログラミングには機械語が利用された(嶋正利,1987,p.84)。「(電卓の演算動作に関わる)マクロ命令に相当するルーチンをマイクロ命令で組むために 400 バイト、プリンター制御に 150 バイト、キーボード制御に 150 バイトほどが必要」という推定のもとにプログラミング作業が開始されたが、実際の総プログラム容量も ROM1 キロバイト内にうまく収められた(嶋正利,1987,p.63)。

(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 番台をバイポ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に対しても4桁の型番を割り当てることにしたが、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単体では機能しないことから、インテル社は、マイクロプロセッサ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 "an LSI micro computer set"、"a microprogrammable computer set" 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 4001、RAM の型番を 4002、シフトレジスタの型番を 4003、マイクロプロセッサの型番を 4004 とした。

図3 MCS-4 の発表当時の広告(1971)



[図の出典] R. Noyce and M. Hoff (1981) "A History of Microprocessor Development at Intel," *IEEE Micro*, Vol.1, No.1, p.9
[原出所] *Electronic News*, November 15, 1971

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を組み合わせることで 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 3 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 $8\text{bit}/\text{語} \times 256 \text{ 語} = 2048\text{bit} = 256\text{byte}$) 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 $4\text{bit}/\text{語} \times 80 \text{ 語} = 320\text{bit} = 40\text{byte}$) 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わせたもの)。
4004	CPU	1971 年 3 月	4ビット・マイクロプロセッサ、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4 4001、4002、4004 の関連に関する図

[出典]Intel(1971),p.1

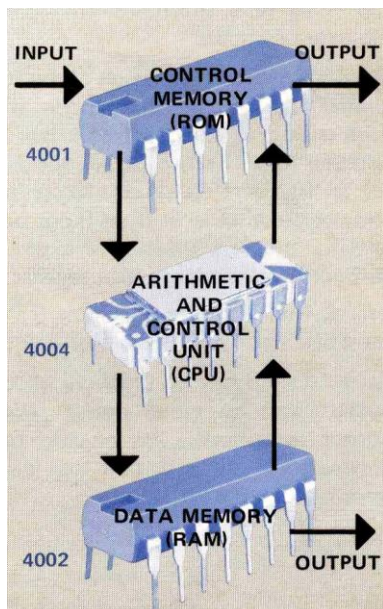
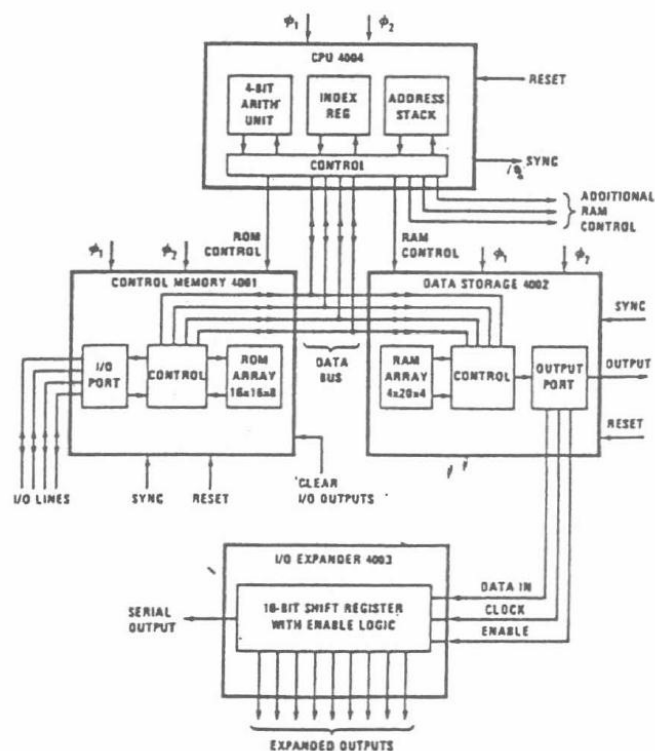


図5 MCS-4 のシステム構成図(1)

[出典]Faggin et al.(1972) p.1



上図を日本語化した図が嶋正利(1987,p.60)に掲載されている。嶋正利(1995a,p.68)にある同様の図では、CPU4004 の制御部が「バス制御」と「命令レジスタ&制御」の二つに分割されている。

CPU の 4004 と ROM の 4001 や RAM の 4002 は、データを双方向にやり取り可能な 4 ビットのシステム・バスで結合されている。

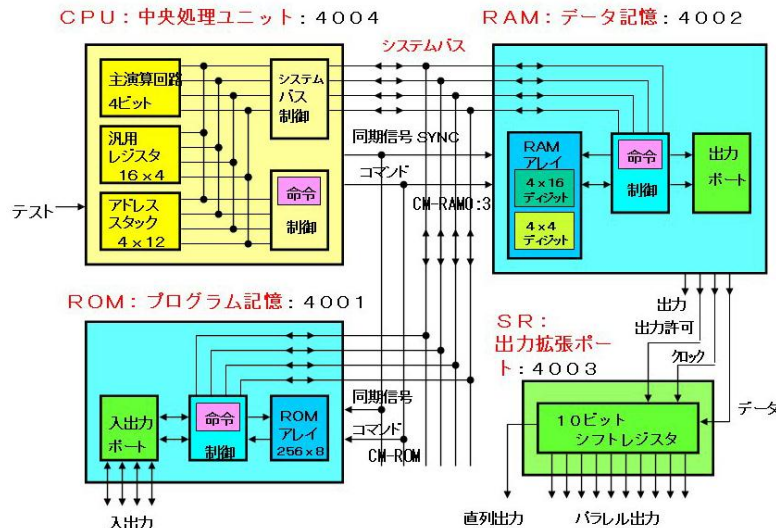


図6 MCS-4 のシステム構成図(2)

[出典] 嶋正利(2007g)

(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「低性能」な 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によるイノベーションはクリンステンセンが言う意味での「破壊的イノベーション」(disruptive innovation)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であった。

実際、世界初のマイクロプロセッサの開発は、CPU の開発経験の豊富なメインフレーム・コンピュータ・メーカーやミニコン・メーカーによってではなく、メモリを専門とするインテルと、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。嶋は分業が進んでいたその当時の技術者にはできなかったという意味で「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でしょう。」(嶋正利,1989,p.49)と語っているが、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開発者たちにマイクロプロセッサ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 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った。

マイクロプロセッサとともに 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、プログラム用に大量のメモリ(fairly large program memory)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、インテル側のそ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、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はあったものの、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」⁽¹⁰⁾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単純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単純化させ、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 を中核とする「マイクロ・コンピュータ・システム(Micro Computer System)」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(This set of components is not designed to compete with the minicomputer, but rather to extend the concept of the dedicated computer into new applications where the minimization of cost and size are very important, but where speed is not a major factor.)」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。

(10) 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方式のこと(嶋正利,1987,p.58)。

(6) 参考文献

a. 4004 を含むシステム「MCS-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 の再録先

R. Noyce and M. Hoff (1981) "A History of Microprocessor Development at Intel," *IEEE Micro*, Vol.1, No.1, p.9

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、p.vi の図1

http://download.intel.com/museum/research/arc_collect/history_docs/pix/announcingad.jpg

嶋正利(1987)p.vi の図1ほどではないが、Intel の Web ページの図も 4001、4002、4003 を示す型番をほとんど読み取ることができない。図としては、R. Noyce and M. Hoff (1981) "A History of Microprocessor Development at Intel," *IEEE Micro*, Vol.1, No.1, p.9 の方が適切である。

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

Intel (1973) *MCS-4 Micro Computer Set Users Manual*, February 1973, <http://download.intel.com/museum/archives/pdf/msc4.pdf>またはhttp://www.bitsavers.org/pdf/intel/MCS4/MCS-4_UsersManual_Feb73.pdf

Intel (1987) *4004 Data Sheet*, http://download.intel.com/museum/archives/pdf/4004_datasheet.pdf

<歴史関連>

Intel(1998) "Interact with History", <http://www.intel.com/intel/museum/25anniv/iwh/>

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/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/press/2001/011115a.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> や <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 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.

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

Cassell, J. (1999) "Who Really Invented The Microprocessor?," 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, pp.145-150

Faggin, F. Hoff, T., Mazor, S., Shima, M. (1996) "The History of the 4004", *IEEE Micro*, December 1996, pp.10-20

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

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," Computer History Museum, http://archive.computerhistory.org/resources/text/Oral_History/Intel_4004/Intel_4004_1.oral_history.2006.102657974.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とは少し異なり 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), Scientific

American.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

富田倫生(1994)『パソコン創世記』TBS ブリタニカ

富田倫生(1996)『エキスパンドブック版 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. 嶋 正利（しま まさとし）氏の略歴に関しては下記の Web ページや論文が参考となる。

「日本のコンピュータパイオニア 嶋正利」<http://www.ipsj.or.jp/katsudou/museum/pioneer/sima.html>

ちえの和WEBページ(ソフトウェア制作会社)『コンピュータ偉人伝 第二部 嶋 正利』(1999/04/13 掲載)、http://www.chienowa.co.jp/frame1/ijinden2/Shima_Masatoshi.html

稲森財団(2005)「1997 年の第13回京都章(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

f. マイクロプロセッサ開発に関連した嶋正利氏の自身の著作としては下記がある。

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.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)日経マグローヒル社、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(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生まれたのか」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」[畑田耕一・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>でダウンロードできる)

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

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 Span 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

g. 嶋正利氏関連著作

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

h. ビジコン社関連資料

ビジコン,インテル(1970)「ビジコン社がインテル社と交わした契約書」、<http://www.busicom-corp.com/intel1.html> (<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

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