

マイクロプロセッサ 4004 の開発

嶋 正利 (マイクロプロセッサ・アーキテクト)



1. はじめに

世界初のマイクロプロセッサ 4004 は電卓やオフィス機器向け汎用 LSI を開発する過程で 1971 年 3 月に誕生した。マイクロプロセッサは、知的能力と計算力を提供し、「新時代を切り拓く技術」となり、新たな文化を創造する「知への道具」を人類にもたらした。

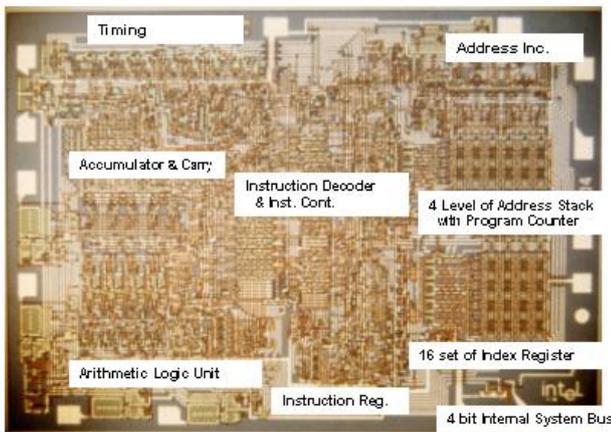


図 1. 世界初のマイクロプロセッサ 4004 のチップ

2. 電子式卓上計算器の登場

世界初の電子式計算器(電卓)は、ネオンガスを封入した真空管を使った英国 Sumlock-Comptometer の Anita Mark 8 で、1961 年 10 月のロンドン博覧会に出品された。高価過ぎてあまり売れなかったが、日本メーカーの電卓開発に大きな影響を与えた。1951 年に接合型トランジスタが開発され「回路の時代」が登場した。トランジスタ電卓は 1964 年に日本で開発され量産化にも成功した。1966 年にビジコンが高性能電卓「ビジコン 161」を破壊的な価格で発売し、価格競争が始まった。電卓はプリンタ付電卓や科学技術計算用電卓へと急成長し花形商品となった。やがて、日本の電卓業界は OEM を含めた世界の電卓ビジネスを一手に引き受け、開発工数と生産コストの削減が必須となった。

電卓は、コンピュータと同じく、入出力装置、処理装置(プロセッサ)、メモリ装置で構成されている。当時の電卓の機能を実現する制御方式としてプリント基板上に部品を配置し基板上の配線で論理を組み上げる「ワイヤードロジック(布線論理)」が採用された。しかし、設計工数が多く機能の変更が難しかった。

3. プログラム論理方式の IC 電卓の開発

私は 1967 年に東北大学理学部を卒業し、ビジコンで電子計算機のプログラマの職に就いた。6 カ月後、電卓の開発部に移り、電卓の試作やキーボードの開発に従事した。入社 2 年目の 8 月に、OEM 先ごとに仕様の異なる電卓の開発を短期間に行う方法として 10 進コンピュータと同様なプログラム論理方式を採用し、プリンタ付き IC 電卓 162P の開発を開始した。私は、ハードウェアとソフトウェアの経験があったので、電卓用の命令セット、プログラム、ハードウェア構成などを担当した。プロセッサは、Program Unit と名付けた制御部を、8 ビットのアドレス更新回路付きプログラムカウンタ、プログラムを格納する ROM、8 ビットの命令レジスタ、マイクロオーダーと名付けたマクロ命令の解読器とマイクロな命令を生成する回路で構築し、ALU & Register Unit と名付けた中央演算ユニットであるデータパス部を、4 ビットのシリアル型主演算回路、4 セットの 4 ビット・レジスタや符号や演算モードなどの制御レジスタ、入力データ・レジスタ、アキュムレータ、乗除算レジスタ、記憶用データ・メモリなどで構築した。命令セットは電卓機能に特化した 23 種類、データタイプは n 桁の 10 進数データと 4 ビットの 2 進数データであった。キーボードやプリンタなどの入出力機器制御はワイヤードロジック制御方式で実現した。プログラム・ステップ数は 256 以下であった。

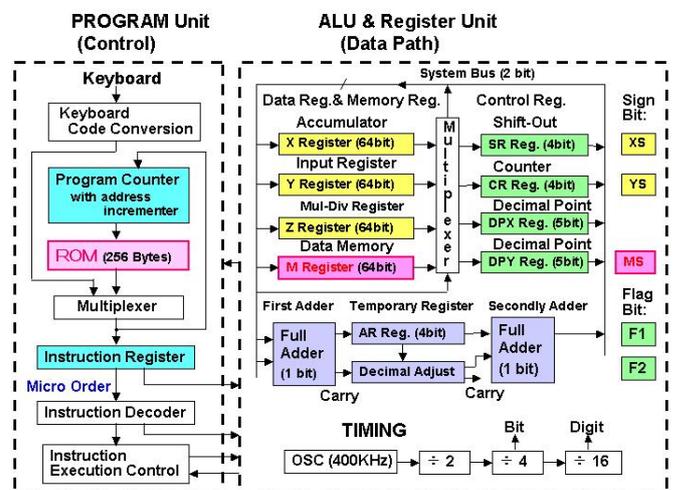


図 2. プログラム論理方式プロセッサのブロック図

4. プログラム論理方式の電卓のLSI化

日本の電卓業界は、LSI化による、低価格化、軽量化、高信頼性化、高性能化、多機能化への道を一齐に走り出した。1968年にシャープがLSI電卓を発表した。使用トランジスタ数は約3,460であった。

ビジコンは、共同開発先として、1967年にノイス博士(R.N.Noyce)らによって設立され高密度実装と高性能が実現可能な新世代半導体プロセスであるシリコンゲートMOSプロセスを開発したインテルを選択した。

1968年末に、LSI化プロジェクトチームはLSI設計に関する技術情報を入手しLSI化の検討を開始した。私は、プロジェクトチームの3人の中で一番下の技術者として、次世代10進コンピュータの仕様とLSI設計手法を策定した。開発予定のシステムは、ビジネス用と科学技術計算用の電卓のほか、多種類の入出力機器(キーボード、表示、プリンタ、CRT、カードリーダー、紙テープ読取装置と紙テープさん孔装置を備えた電動タイプライター)を搭載した伝票発行機、銀行の窓口端末機、キャッシュレジスタなどのビジネス機器であった。ただし、OEM先との関係で、電卓以外の応用はインテルには開示しなかった。開発するプロセッサでは、ビジネス機器に使えるように命令セットと機能を汎用化し、繰り返し使うプログラム用のアドレス・スタックを新設した。大半の論理図も作成した。詳細な回路図はインテルと共同で作成する予定だった。

1969年6月に渡米し、インテルと打ち合わせを開始した。ところが、ビジコンが提案したLSIの仕様、キーボードや表示やパラレルプリンタなどの入出力機器の実時間制御、論理図などを理解させるのは非常に難しかった。詳細な打ち合わせに入ると、壁にゴツゴツ突き当たる日が多くなった。メモリ専門の半導体会社であったインテルの大半の技術者は化学と物理と回路の専門家で、論理設計者は全くいなかった。正式契約締結後の論理設計者の雇用、少数ピン・パッケージ、2,000個以下のトランジスタ、3種類以下のLSI開発など、インテル側の制約は開示されなかった。幸運なことに、コンピュータ、ソフトウェア、論理、回路、CADなどに詳しいホフ博士(M.E.Hoff)が担当者となった。

ビジコンは、閉塞したプロジェクトの進捗を図るために、正式契約の締結前で社外秘であったが、プログラム論理方式の10進コンピュータ用マクロ命令、応用プログラム、LSIシステム、プログラム制御LSI、中央演算ユニットLSIなどの詳細を開示した。ホフは私の提案に非常に大きな興味を示した。

5. 4ビット2進プロセッサの基本案

共同開発が暗礁に乗り上げそうになった8月下旬の或る日、ホフが、突然、数枚のコピーを片手に、興奮気

味に、私達の部屋に飛び込んできた。ホフが最初に示したブロック図にはプロセッサの骨格だけが描かれていた。その図には、①アキュムレータとキャリーを含む4ビットの主演算モジュール、②16セットの4ビット汎用レジスタ・モジュール(2つ組み合わせでビジコン案の8ビットのアドレスレジスタとなる)、③サブルーチンが3段までネスタリング可能なプログラムカウンタを含む4段の12ビット・アドレス用スタック・モジュールの3つの箱と、④キーボードとのインタフェースに使う4本の入力ピンが描かれていた。私の提案は、n桁の10進データを取り扱うマクロなレベルの命令セットを実装した10進コンピュータであった。これに対して、ホフの提案は1桁という4ビットの2進数データを取り扱う低レベルのマイクロな命令を実装する4ビットの2進コンピュータであった。世界初のマイクロプロセッサ4004の産声であった。

後年、ホフはインタビューに答えて、「ビジコンの要求は電卓のファミリー全体に使えるLSIが欲しいという特異なものであり、それを個々の製品とするために、ROMプログラム技術を使おうとしていた。しかし、私はむしろ、プログラム機能を多少持った電卓として作るよりも、それを、電卓として使えるようにプログラムできる、汎用コンピュータのようなものにしたかった」と述べている。

6. 4ビット2進プロセッサの問題と解決方法

9月初旬にホフから提案された命令セットは、コンピュータの基本命令に、電卓向け命令をほんの少し追加しただけだった。4ビットの2進コンピュータには解決すべき問題があり、プロジェクトも再開となるが、ビジコンは、システム設計用の次世代プログラム論理方式となる可能性があるとして評価した。インテルから最初のカードが出され、本格的な交渉が始まった。今度は、応用技術に熟知したビジコンの出番となった。電卓の重要と思われる機能について、プログラムを組みプログラム・ステップ数を集計し、命令の静的な評価(ROMのバイト数)と動的な評価(性能)を行った。また、キーボードのキーを押したときの接触時間の計測などを日本に依頼し、プログラムによる入出力機器の制御方法を検討した。最終的に、5つの問題点が表面化した。

インテル案の最大の問題点は、LSIのみによるシステム構築を考慮しない、プロセッサのみの開発だった。システムからの要求をインテルに合意させることは容易な交渉ではなかった。第一次改善策として、プログラムを格納するROMとデータを格納するRAMをLSIファミリーとして開発し、時分割した4ビット幅の双方向性システムバスを介してプロセッサに結合させる案を共同して提案した。

次に、2番目の問題点である2進数データのみ演算命令に対して、加算後に使う10進補正命令を追加し

た。入出力機器制御のプログラム化に関しては未解決であった。第二次改善策の具体的な策定と書類化の大半をビジコンが行った。

電卓向け応用プログラムが組みにくく大量のROMを必要とした3番目の問題点は、電卓用プログラム中のマクロ命令ストリームをネイティブ命令ストリームに翻訳しつつ実行するインタプリタ方式をサポートする命令群の追加とインタプリタ・プログラムの開発などで解決した。レジスタ間接分岐命令やサブルーチンからの復帰時に戻り値を格納する復帰命令などを追加した。

入出力機器をプログラムで実時間制御する4番目の問題点は、多くのトランジスタを必要とする割り込み機能ではなく、プロセッサに入力した外界の状況を判断する条件分岐命令を追加した。プリンタからの同期信号を条件の1つとして使う条件分岐命令を、インタプリタ・プログラムの中に組み込み、1ミリ秒に1回、外界の状態をセンスし、プロセッサを時分割して使い、入出力機器を実時間で制御した。また、キーボード・スキャンやプリント・バッファ用に10ビットのスタティック型シフトレジスタSRの開発を決めた。

第5の問題点は、性能、命令セット、ROM容量、使用可能なトランジスタ数などの最適化であった。

4004CPUの命令セットの進化を見ると、アイデアの創出後、紆余曲折を経て最終案を決定したことがわかる。11月に全ての仕様が決まり、図入りの機能仕様書と設計計画書を英文で作成し、12月に帰国した。

7. 発注者が4004CPUの論理設計を担当

1970年3月に正式契約が結ばれ、インテルが設計している論理回路図の確認のために、4月7日に、私一人でインテルを訪問した。ホフは、新しい回路設計技術者であるファジン(F. Faggin)を紹介し「後は彼が担当するから」と言い残し、休暇を取ってしまった。1枚の図面も作成されていなかった。

私は、ファジンに4004CPUと4004ファミリーLSIの機能仕様書と設計計画書を説明し、4001ROMと4002RAMと4003SRなどの詳細なブロック図とタイミング図と論理表などの書類を大至急作成した。

ホフの休暇明けに、仕事の分担を決めた。私の担当は、4004CPUの論理設計、論理シミュレーション、レイアウトチェック、テストプログラム作成となった。ファジンの担当はRAMとROMとSRのすべての設計と4004の回路設計とレイアウト設計となった。ホフの担当は論理シミュレータ用CAD作成となった。ビジコンの担当は、私が作成した論理図に基づいてTTL回路などを使った4004CPUエミュレータの作成と論理の検証となった。

その頃の半導体のレイアウトは電卓の基板設計と同じく2次元の世界だったので、電卓の基板設計の経験が生かされた。トランジスタという部品の配置を考え、横方向の配線にメタルを使い、縦方向の配線にポリシリコンや拡散層を使い、論理設計を行った。設計に入ると時間は待ってくれない。詳細なブロック図を作成後、論理設計に入ると、集中力を持続しつつ自分の考え方を如何に収束させ最適化を図るかが重要となった。完成した論理図を回路設計やレイアウト設計に使えるように、トランジスタのサイズが入っていない論理図を作成した。まず、A2サイズの紙を3枚用意した。各モジュールとのインタフェース

転送制御命令 (分岐命令)			アドレスポインタ送出命令:		
JUN	A1A2A3	Jump Direct	SRC	Rn	Send Address Pointer Rn to RAM & ROM
JCN	CC A1A2	Jump On Conditional	DL		<i>Designate Command Line</i> <i>Acc → Command Register + RAM select</i>
JIN	Rn	Jump Indirect	特殊論理演算命令:		
ISZ	Rn, A1A2	Increment Rn and Jump if not zero			
JMS	A1A2A3	Jump to Subroutine	ADD	Rn	Add Rn to Accumulator with carry
BBL	d	Return from Subroutine & d → Acc	ADM		Add RAM Character to Acc. with carry
データ転送命令:			SUB	Rn	Subtract Rn from Acc. with borrow
LD	Rn	Move Rn to Acc.	SBM		Subtract RAM Char. from Acc. with borrow
XCH	Rn	Exchange Rn and Acc.	INC	Rn	Increment Rn
STP	Rn	Store Acc to Rn	IAC		Increment Acc.
LDM	d	Load Immediate to Acc.	DAC		Decrement Acc.
FIM	RRn, dd	Load Immediate to RRn	RAR		<i>Rotate Right Acc. with Carry</i>
FR	RRn	Fetch Immediate from [RRn] to RRn	RAL		<i>Rotate Left Acc. with Carry</i>
ROM		Read RAM to Acc.	SRP		Shift Right Acc.
RD [0-3]		Read RAM Reg. [0-3] to Acc.	SPL		Shift Left Acc.
RRSgn		Read RAM Reg. Sign to Acc.	CLA		Clear Acc.
RDP		Read RAM Reg. DP to Acc.	CLB		<i>Clear both Acc. and Carry</i>
RDR		Read ROM input port to Acc.	CMA		Complement Acc.
WRM		Write Acc. to RAM	STC		Set Carry
WR [0-3]		Write Acc. to RAM Reg. [0-3]	CLC		Clear Carry
RRSgn		Write Acc. to RAM Reg. Sign	CBC		<i>Complement Carry</i>
RDP		Write Acc. to RAM Reg. DP	TCC		Transmit Carry to Acc. then clear Carry
WR		Write Acc. to ROM output port	DAA		Decimal Adjustment for Add
WRP		Write Acc. to RAM output port	TCS		<i>Subtract Carry from Acc.</i>
CLDR		Clear All of RAM and RAM Reg.	KCP		<i>Keyboard Process for Code Conversion</i>
DSPOV		Display Output is Enabled	NCP		<i>No Operation</i>
DSPOFF		Display Output is Disabled	HLT	n	HALT for External Signals
RKCP		Read Input Data on Keyboard Port			

細文字の命令はインテルが提案した基本命令

太い文字の命令はビジコンとインテルが共同して新設した命令

細斜体文字の命令はインテルが提案し、その後削除された命令

太い斜体文字の命令はビジコンが提案した命令

表 1. 4004CPUの命令セットの進化

を考慮しつつ、左側の 1 枚に主演算回路とコマンド制御とタイミングとシステムバスなどのモジュールを、右側の 1 枚に汎用レジスタとアドレス用スタックなどのモジュールを、中央の 1 枚に命令レジスタと命令デコーダ/エンコーダを含む命令実行制御などのモジュールを描いた。トランジスタ数は 2,237 となった。

4004CPU のレイアウトが自分の描いた論理図通りに出来上がったときは感激した。回路設計やレイアウト設計やテストプログラム作成に関する設計マニュアルや設計プランなどの作成の重要性を実感した。折角アメリカ西海岸まで来たので、アメリカとヨーロッパで市場調査をし 11 月末に帰国した。

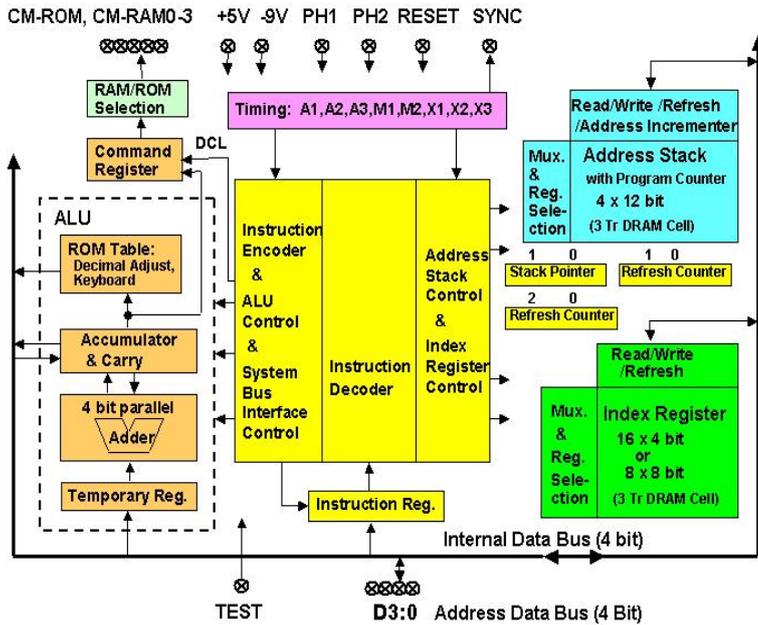


図 3. 4004CPU のブロック図

8. マイクロプロセッサ 4004 を使った電卓

帰国後、新型プリンタ付き電卓用プログラムを作成し、1971 年 3 月に完成した。電卓のプログラムの総容量は 1K バイト以内で、応用プログラムは約 250 バイト、マクロ命令用プログラムは約 400 バイト、インタプリタとキーボード制御とプリンタ制御は約 350 バイトとなった。

1971 年 4 月に入ると、待ちに待った 4004CPU が羽田に到着した。開発支援システムとして使える試作用エンジニアリング・システムが完成し、いよいよ待ちに待った火入れ式である。1K バイトのプログラムをカードリーダーを使って読み込ませた。あとは、システムのリセット・ボタンを押して放すだけだった。失敗への恐れはなかった。リセット・ボタンを押したが放せない。放せば、結果が出る。思い切ってリセット・ボタンを放した。電卓が始動し、プログラムがスタートした。表示は入力プログラムの実行を示した。もう待てなかった。数字キーを押し、

次に加算キーを押した。プリントされるまでの時間が随分と長く感じた。プリンタがうなりを上げ動作を開始し何かを印字した。「動いた！」。心臓がブルブルと動いて、体が急激に熱くなった。不思議と頭だけは醒めていた。

非常にスムーズにプログラムのデバッグが終了した。論理ミスもプログラム・ミスもなかった。終わってみれば、意外とあつけないマイクロプロセッサとマイクロプロセッサを使った電卓の誕生であった。電卓用試作機のリセット・ボタンに手を触れたときの感触と、リセット・ボタンを放す時の希望と不安が入り混じった胸の鼓動を今でも覚えている。

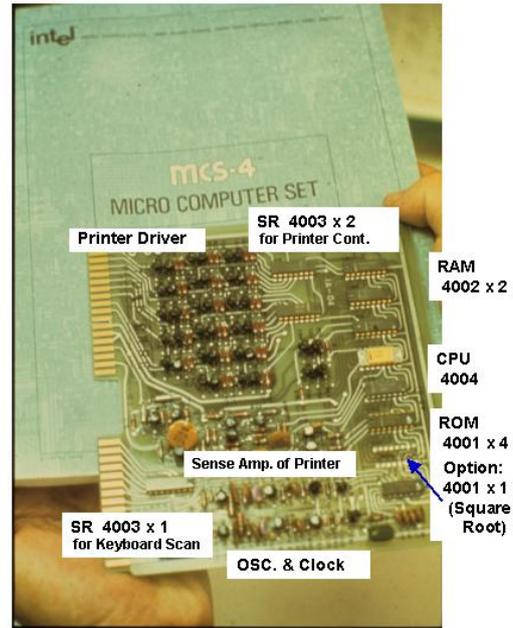


図 4. 4004CPU を組み込んだ電卓の基板



図 5. 4004CPU を組み込んだプリンタ電卓

参考文献

- 1) 「マイクロコンピュータの誕生:わが青春の 4004」、岩波書店、1987 年 8 月
- 2) M.Shima, "The 4004 CPU of My Youth", IEEE Solid-State Circuits Magazine, Winter 2009
- 3) 嶋正利のプロセッサ温故知新、ITPro、日経 BP 2006 年 3 月~2007 年 7 月にブログ連載