

講座：手作りスーパーコンピュータのスズメII

2. 電子回路を知らない人のための入門編(1)

～基礎：今日から開発を行うために～

伊藤 智 義

(群馬大学工学部)

(1993年12月27日受理)

Guide for Beginners (1)

ITO Tomoyoshi

(Received 27 December 1993)

Abstract

This and the next sections are guides for beginners of hardware. Today's advanced technology can get us to make a hand-made computer for our own purpose. Making a computer is not so difficult as we think. Hardware is not hard. In this section, I introduce equipment by which even beginners can start on hardware. The cost of the equipment is 500,000~1,000,000 Japanese yen (5,000~10,000 U.S. dollars). Cost of electric parts for a one board sized computer is roughly 500,000 Japanese yen (5,000 U.S. dollars).

Keywords:

hardware, computer, electronic circuit, electronic engineering, numerical simulation,

1. はじめに —ハードウェアは意外と簡単—

「君、計算機を作ってみないか？」

私がそう言われたのは大学院入試が終わってすぐの学部4年の9月のことであった。当時天文学に興味を持っていた私は別の学科から東京大学教養学部の杉本大一郎教授の研究室を大学院入試で志望していた。8月終わりに試験があり9月始めに合格発表があって、運良く合格できた。その翌日、杉本さんが私に言ったのが冒頭の言葉である。

当時の私はパソコンすら満足にいじったことの

ない、ハードもソフトもわからない、コンピュータに関してはまるで素人であった。しかも他の学科からわざわざ杉本研究室を志望したのは天文学を学ぶためである、なんで計算機なんか…、そう内心思ったものである。しかし幸か不幸か私は基本的に小心者であった。これから指導教官になろうという人に反論できるべくもなく「はあ…」と力なくうなづくだけであった。1988年、5年前のことである。

当時の杉本研究室は主に銀河や銀河のまわりに点在する球状星団などの星の集団を扱う重力多体

問題を、数値計算によって研究していた。ところが重力多体問題というのは計算すべき力は文字通り重力(万有引力)だけなのであるが、粒子数を増やすと計算量は粒子数の2乗に比例して増大してしまうやっかいな問題であった。当時はスーパーコンピュータを使ったとしても 10^4 体がせいぜいであった。

計算パワーが研究をリミットする→もっと速い計算機が欲しい→しかし、そんなものは売られていない→だったらどうするか…

ちょうどその夏、野辺山天文台の近田さんが重力多体問題専用計算機の構想を発表していた。杉本研ではそれを実際に作ってみようと考えたのである。

私たちは10月に近田さんを訪ねた。近田さんは当時すでにFX [1,2]という野辺山天文台の電波望遠鏡で得られたデータを高速に処理するための専用計算機を開発していた人でハードウェアの専門家であった。一方、当時の杉本研究室には、もちろん私も含めて、誰一人としてハードウェアがわかる人はいなかった。そんな私たちに近田さんは重力多体問題専用計算機概念から実際の開発に関することまで2時間ほどかけて丁寧に説明してくれた。その説明を聞き終えて、不遜にも私はこう思った。「なんか簡単だな…」と。

あまりに知識が足りない場合、物事が実際以上に簡単に思えてしまうことはあり得ることである。この時をはじめはそんなことだろうと思っていた。調べれば調べるほどわからなくなっていくのではないかと不安もあった。ところが翌4月になって大学院に入学し、本格的に重力多体問題専用計算機の開発が始まると、6月には設計図がかき上がり、9月には試作1号機GRAPE-1 (GRAvity piPE) [3,4]が完成した。GRAPE-1はわずか20万円の材料費で演算速度は240Mflops相当に達した。これは初期のスーパーコンピュータCRAY-1の演算速度に匹敵し、当時のワークステーションより100倍速かった。開発期間はわずかに6ヶ月であった。

これは何も私が優秀であったからというわけではない(残念ながら)。事実、翌年には学部4年の

学生が私と同じ半年でGRAPE-1の改良機GRAPE-1A [5]を卒業研究の範囲で作り上げたのである(名前を福重俊幸といい、現在東京大学教養学部の博士1年である)。

では、うまくいった理由はどこにあったのか。もちろん、いろいろお世話になった人は大勢いるのであるが、今は失礼を承知でそれを省略するとして、一つだけ理由を上げるとすれば、時期が非常に良かったということになる。5年前というのは世間では16bitのパソコンが普及し、32bit機が売れ始めた頃である。ハードの世界では1MbitのROM(Read Only Memory)やRAM(Random Access Memory)、32bitや64bitの演算器が手頃な値段で入手できるようになり始めた時期であった。つまり計算機材料が専門家の手を離れ、誰でも自分なりの計算機を作れるようになった時期である。現在はさらにテクノロジーが進歩し、ハード作りがますます容易になっているのはいうまでもない。

専用計算機を作るということは意外に思えるほど難しくない。それはテクノロジーの進歩によりICの集積度が上がり、複雑な部分はICの内部で処理されてしまうためであり、うまくICを選べば、ほとんどプラモデルを組み上げるように計算機を作ることができる。

専用計算機という研究分野があるとすれば、それは現代の急速な電子工学の発展のために極めて特異な状況にある。一つはベテランの権威がほとんど役に立たないということである。10年前に何百万円もしたコンピュータが今では粗大ごみのように扱われているように、10年前の知識などはほとんど価値を持たない。10年前の専門書より今売られている雑誌の広告をながめてみる方がよほど有益である。批判を覚悟でいえば、大学で電子工学の授業を受けていようがいまいが大差はなく、今から専用計算機に取り組んだ人でも1年もすれば立派な専門家のように振る舞うことができるはずである。私がこのような解説記事を臆面もなく書けるのもそのためであり、新規参入者に対する門戸は実感として非常に広い。

もう一つの特徴は開発サイクルが意外なほど短

いということである。一つの専用計算機が半年ないし1年程度でできあがるというと、とてもはやいように思われるかも知れないが、逆にいえば、その程度で完成してくれなければ専用計算機の有効性は半減する。例えば、壮大な計画を立て、設計から5年もたってやっと完成したとしても、そのような計算機はもうその頃には時代遅れで使いものにならないということにもなりかねない。設計してから1年程度には計算機が完成する、そのくらいまでハード開発の状況は進歩しているのである。

現代の、特に日本は、計算機を作る上ではもっとも恵まれた環境にある。しかしその恩恵を受け、利用している人はまだまだ少ないように思われる。私は今後、ソフトウェアを書くようにハードウェアも組み立てる、そういう研究スタイルが数値実験家の間で主流になる時代が来ると考えて

いる。もしこの記事を読んで、「なんだ計算機ってこんなに簡単に作れるのか」と感じてくれる人が一人でもいたなら、幸いである。

2. これだけはそろえよう

では、実際に試作機を作るにはどの程度の準備が必要かということから話を進めたい。上を見ればきりはないが、必要最小限で、しかも実際の開発に際してさほどの不自由を感じない程度のシステムを前提にしよう。

表1に必要な道具を掲げた。

(1) ハンダゴテ

昔のように配線をハンダで行うことはないのので、ハンダ付けの巧拙が試作機の信頼性を左右することは少ない。「いもハンダ」とバカにされても気にすることはない。確実に付けるように心がけよう。

ハンダは主に、基板にICソケットの電源端子とGND(グラウンド)端子を接続したり、コンデ

表1 ハードウェア開発に必要な設備

品名	価格のめやす(円)
ハンダゴテ	3,000
ヒータ付きハンダ吸引器	4,000
ラッピング・ツール	50,000
アンラップ	2,000
ROMライター	100,000～
ROMイレイサ	10,000
PLDライター	200,000～
テスタ	3,000
ロジック・トーン	3,000
ロジック・アナライザ	100,000～
ピンセット	1,000
ニッパ	1,000
PGA用IC引抜き器	20,000
計	500,000～
CAD	300,000～

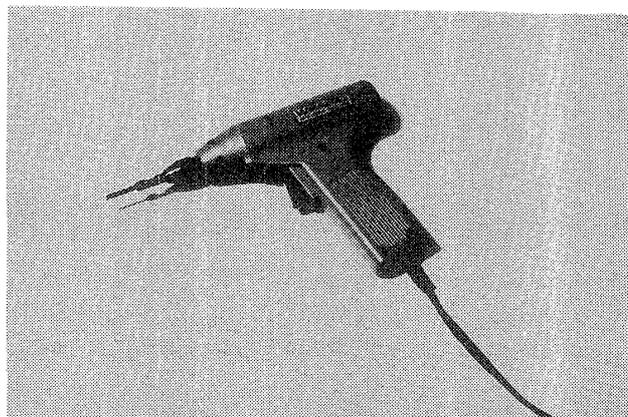


写真1 ラッピング・ツール

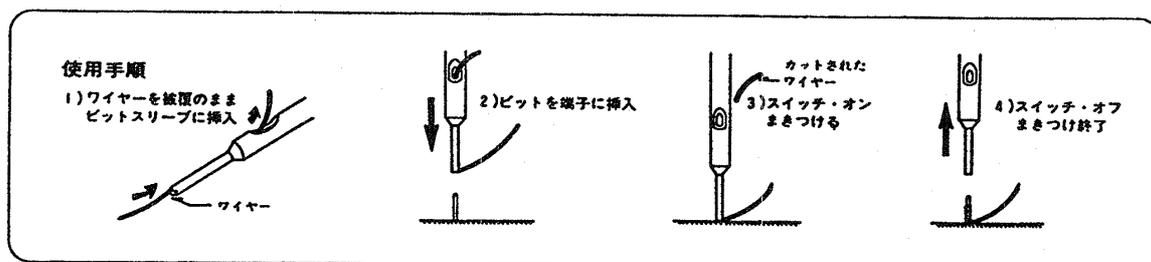


図1 ラッピングツールの操作方法(エブレン社のカタログより)

ンサや抵抗などを基板に付けるときに使う。電源端子と GND 端子をハンダ付けすることにより、IC ソケットは固定される。間違えたときには吸引器でハンダを吸い取る。銅線を編んで作ったテープ状のものでもよいが、ヒーター付きの吸引器を使うと便利である。

(2) ラッピング・ツール

今では、配線はラッピング・ツールで行う。操作は簡単であり、誰が行っても大差はない。ハンダ付けの時代に比べると配線の信頼性は格段に向上した。間違ったときには、アンラップでほくく。

操作方法は図1の通りである。IC ソケットはラッピングが3回分行える足の長いものを使う。ちょっとした注意であるが、複数のピンを配線するときには順番を考える必要がある。図2の(A)は悪い例で、(B)が正しい。これは配線ミスをした場合、(A)ではミスを修正するためには、最悪の場合、すべての線をほどかなければならないからで、(B)では最悪の場合でも3本ですむ。

(3) ROM ライタ

手作りコンピュータを作る場合、ROM (Read Only Memory) はとても重要な存在である。ROM は読み出し専用のメモリのことで、その中

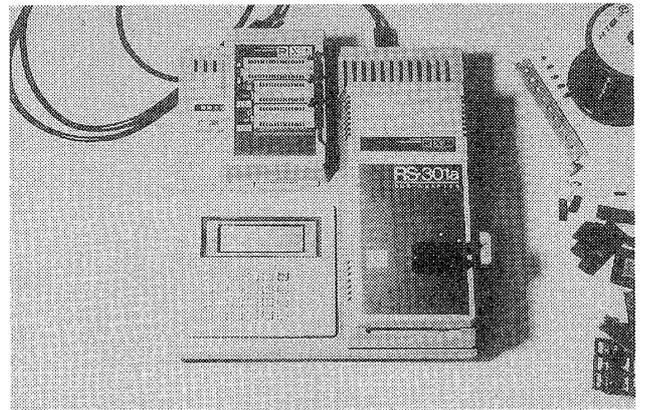


写真2 ROM・PLD ライタ(兼用)
(アパールデータ社製より)

身は ROM ライタで自由に作る事が出来る。多くの ROM は紫外線によりデータを消去できるので、データを間違えたり、変更したいときにはイレイサで消去してからもう一度 ROM ライタで書き込めばよい。

ROM は任意のデータ変換器であると同時に、精度が低くてよい場合は任意の演算器として使うことができる。例えば、64k × 16bit の 1 Mbit ROM はアドレス幅16bit、データ幅16bit を持っているので、16bit までならデータを任意に変換することができる。どんなに複雑な演算でも1変数ならば、演算結果の表をこの ROM に書き込んでしまえば1個のチップで済んでしまう。

単精度 (32bit) の演算でも ROM は重要な働きをする。市販されている演算器には、1クロックで足し算 (引き算) を行なう加算器、かけ算を行う乗算器はあるが、1クロックで割り算をする除算器はない。したがって専用計算機を作る場合、加算器、乗算器と、メモリを利用したテーブルを組み合わせる演算部分を作ることになる。その場合、メモリの大きさがハード開発の難易を左右する。現在では16Mbit までの ROM が入手できるので、これを使うと単精度ならば任意の1変数関数が線形補間式で構成できる。メモリ IC の集積度が増大したことが専用計算機作りを飛躍的に容易にしたのである。

少し詳しく説明しておこう。いま、任意の関数 $F(X)$ をテーラー展開すると



(A) 正しくない例



(B) 正しい例

図2 配線の順序

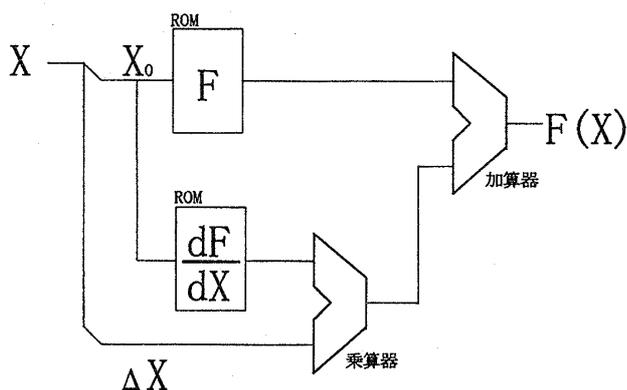


図3 任意の関数の線形補間回路

$$F(X) = F(X_0) + \left. \frac{dF}{dX} \right|_{X_0} \Delta X + \left. \frac{d^2F}{dX^2} \right|_{X_0} \times (\Delta X)^2 + \dots, \\ (X = X_0 + \Delta X)$$

となる。ここで $F(X_0)$ と $\left. \frac{dF}{dX} \right|_{X_0}$ は ROM で構成する $2^{20} \times 16$ (16M) bit の ROM を 2 個使って $2^{20} \times 32$ bit のテーブルを作るとすると、入力 X_0 (X の上位部分) は 20bit となる。符号 bit は別に扱うとすると、 X は 31bit なので、 ΔX (X の下位部分) は 11bit になる。ここで ΔX^2 を計算してみると 32bit の精度 (単精度) 以下の数値になることがわかるので、2 次以降の高次の項は無視できるのである。

図 3 に回路の構成も示しておこう。とても簡単に見えるかもしれないが、その通り実際とても簡単である。ただし、実際の回路では ROM の前後にレジスタを入れて同期を取ったりする。ここで大切なことは、ハードの構成が $F(X)$ の形に依存しないことである。どんなに複雑な式でもよい。というより、複雑になればなるほどハードウェア化の利点は大きくなるというものである。

ただし、これはあくまで単精度までの話である。倍精度になると途端に回路は複雑になる。これからハードに取り組むときには、まず単精度で済む問題にターゲットをしばった方がよい。もし自分の計算にどうしても倍精度が必要なときには、計算のどの部分に倍精度が必要でどの部分に

は必要でないかを見きわめ、なるべく倍精度の演算が少なくなるように考えるべきである。専用計算機を手作りする場合、データ幅の設定は非常に重要であり、開発の難度は bit 数の 2 乗に比例するくらいの感じがある。

(4) PLD ライタ

ROM と並んで重要な働きをするのが、PLD (Programmable Logic Device) である。ROM がデータそのものを書き込むものなのに対し、PLD は論理式が書き込める IC だと考えてもらえばよい。ピン数の許す範囲なら、任意の機能を持つ自分専用のチップを作ることができる。例えば、7 bit カウンタが欲しい場合、以前なら市販の 4 bit カウンタを組み合わせて作ったりしたものであるが、今なら 1 個の PLD で自分で作ることができる。カウンタのように機能が決まったものならば市販のものでもよいが、そこにちょっとした機能を付加させようなどとすると、とたんに組み合わせは大変になる。制御回路が複雑になればなるほど PLD のありがたみが実感できる。回路の構成も非常にシンプルなものになる。

PLD の良さは、もう一つ、デバッグのときにもあらわれる。配線が終わって、いざ電源を入れてみたが、思ったように動いてくれない (それが普通である)。デバッグのはじまりである。ミスが見つかった。普通ならば配線をしなおさなければならぬが、もしそれが PLD を使っている部分ならば、PLD を書き直すだけですむ。配線に手をつけなくて済むのがありがたい。また、テスト用の PLD を自分で用意することもできるので、それを使ってデバッグを効率良く行うこともできる。

PLD は PLD ライタを使って書き込む。多くの PLD は電氣的に消去できるようになっているので、変更したいときには PLD ライタの消去モードで消去してからもう一度書き込めばよい。私たちの研究室にある PLD ライタは 24 ピンの PLD までしか扱えないが、それでも十分便利である。

ただし、PLD はここ 1~2 年めざましく進歩しており、CPLD (Complex PLD) や FPGA (Field Programmable Gate Array) など、より大

規模な PLD が身近なものになってきており、このことは念頭に置いておくべきである。近い将来、FPGA は専用計算機分野、ひいては数値シミュレーションの世界を一変させるはずである。すでに数万ゲート規模の FPGA のリリースがアナウンスされている。ゲートというのはデジタル回路の基本単位であり、ゲート数というのは AND や OR や NOT の論理演算がいくつ含まれているかと考えてもらえばよい。数万ゲートというのはかなり大きな回路である。それが1チップに、しかも自分の好きなように書き込めるのである。わかりやすくいえば、研究室レベルで手軽に安価に専用 LSI までもが作れてしまうということである。そういう時代がすぐそこまで来ているのである。そうすると、今まで同じ土俵（市販の計算機）で運転（プログラミング）の技術を競っていたら良かったドライバー（研究者）が、今度は自分のマシン（専用計算機）を好きに作れることになる。逆にいえば、ドライバーとメカニックの両方をこなせなければ勝負に勝てなくなる。もしかすると、数年から10年先にはハードを知らない数値実験家は淘汰されてしまうかもしれない。FPGA にはそれだけの可能性がある。

(5) テスタ

主に短絡していないかどうか調べるのに使用する。高級なものはない。

(6) ロジック・トーン

これが正式名称なのかどうか定かではないが、ペンシル型の測定器である。ペンの先に端子があ

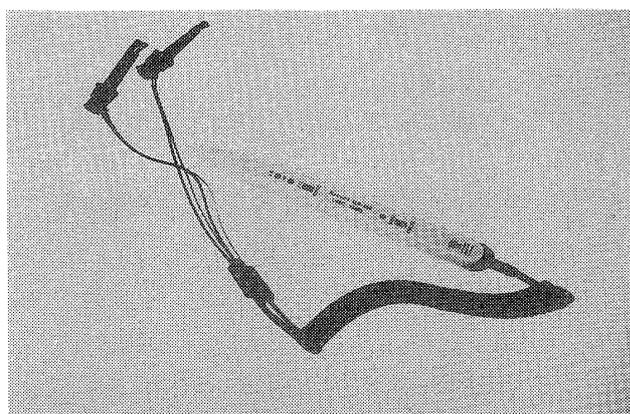


写真3 ロジック・トーン

り、IC のピンに触れて High レベルか Low レベルかを調べる。LED の点灯による区別のほかに、High レベルのときは高い音が鳴り、Low レベルのときは低い音が鳴るというように音の違いでも端子のレベルがわかるようになっている。ちょっとしたチェックによく使う。とても便利である。

(7) ロジック・アナライザ

デバッグの主役である。普通8ないし16本単位でプローブがついていて、各端子の電圧レベルを、設定した周波数ごとにサンプリングするものである。その測定結果と自分が考えていたタイミングチャートを照らし合わせてデバッグを進める。ロジアナという高価なイメージもあるが、パソコン上で使う10万円程度の安価なものでも十分である。プローブは多ければ多いほど便利であるが、はじめは基本ユニットだけでも十分である。不便を感じたら、必要に応じて増設すればよい。測定をする際は、プローブを直接 IC の端子に接続するのは大変なので、洗濯バサミのような IC テストクリップを使う。

ロジアナ以上に馴染み深い測定機器にオシロスコープがあるが、デジタル回路の場合、特に必要なものではない。あれば雑音レベルを測定できるなど、それなりの用途はあるが、なければないで構わない。

(8) その他

よく使う工具としてピンセットとニッパがある。細かい作業が多いので、ピンセットはいたるところで使う。先のとがった丈夫なものを用意する。ニッパは配線するときワイヤを切るのに使う。小さいものを用意する。

専用計算機の主役となることが多い32/64bit の浮動小数点演算器は、正方形の剣山のようにピンが100本以上もついている PGA (Pin Grid Array) のパッケージになっていることが多い。そのような IC を使う場合は、専用の引き抜き器もあると便利である。

(9) CAD (Computer Aided Design)

設計ツールである。回路図は CAD で描くのが普通であるが、実は私は CAD を満足に使いこなしたことがない。CAD も使ったことがないよう

な者がこのような解説記事を書いているなんてと、あきれている人もいるかもしれない。しかし事実なのだからしょうがない。今までに5台の計算機を開発してきたが、設計図はすべて手書きである。研究室で開発できる段階では、CADはなくても不自由しない。幸か不幸か、私が担当したのはそのようなプロトタイプ機ばかりであった。その程度でも計算機は作れてしまう。

しかし、今後はそうはいかないかもしれない。将来、プリント基板や専用LSIを設計・製作するときにはCADは必需品である。FPGAなど大規模なPLDを扱うときにも必要になる。本格的にハードに取り組むつもりなら初めからCADを使っておく方がよい。

ただし、とりあえず軽い気持ちでハードを始めようという人なら、「CADは必要になったら買えばいい」程度に考えておくのも気楽でよい。身軽な状態で始めた方が気が楽だし、かえって長続きしてうまくいく場合も多い。はじめからお金をかけすぎると使命感にかられて精神的につらいということにもなりかねない。

CADは30万円程度から100万円を越えるものまでいろいろあるが、高ければ良いとは限らない。身近に使っている人がいるのなら評判をきいてみるなりして使い勝手の良いものを選ぶことが大切である。CADの操作は意外と疲れるものである。

以上のように、初期設備費としてはCADを除いてトータルで50万円くらいである。意外に安いと思われるかもしれないが、実際に私が使っている設備はこの程度のものである。CADを加えても100万円くらいあれば十分であろう。

次は計算機材料となる電子部品である。これらを使ってボードを組立てていく。

(1) IC (Integrated Circuit)

いろいろのパッケージのものが市販されているが、試作段階ではDIPタイプのものを使う。一番普通に見かける、長方形で長い方の両辺に0.1インチ間隔でピンがついているものである。大きいチップでDIPタイプのものがないときはPGAタイプを選ぶ。これもピン間隔は0.1インチであ

る。ただし、将来プリント基板を作るときなどは、ピン間隔が狭くてパッケージも小さいQFPタイプやPLCCタイプを使うと実装密度が上がって良いだろう。

遅延時間にも注意が必要である。これはIC内部で入力から出力までにかかる時間のことで、例えば遅延時間が100nsのICを使ったとすると、その回路は10MHz以上では動作できなくなる。目指す演算速度に合わせてICを選択する。

主なICを上げておこう。

まずは演算器について。単精度で回路を組む場合、32bit浮動小数点演算器を使うことになる。4cm角のPGAタイプで144ピン程度のものが多い。値段は1個3万円くらい。倍精度が必要な場合は、64bit浮動小数点演算器を使うことになる。同じく4cm角のPGAタイプでピン数は200を越えるものが多い。値段は1個7~10万円くらいと高価である。32/64bit浮動小数点演算器を使う場合、ハードのコストはほぼその個数で決まってくる。16bit以下の演算器は1個数千円で買える。

メモリについては、1Mbitあたり1~2千円程度である。RAM(SRAM)は高速のものが手に入りやすいが、ROMは概して遅いので、ROMを演算部分に組み込むときにはROMのスピードで専用計算機の方が制限される場合も多い。もしそれが嫌だったら、ROMをRAMに換えればよいが、回路は少々複雑になる。

24ピン程度のPLDは1個500~1000円、その他よく使われる74シリーズのICは1個100~500円くらいである。

演算器やメモリなどはCMOSで作られていることが多くて選択の余地はあまりないが、74シリーズなどはTTLのものとCMOSのもの両方が用意されている。さらにTTLにはLS, ALS, Fなどがあり、CMOSにもHCやACなどがある。それぞれに特徴があり、適材適所に使い分ければよいが、よくわからない場合はALSを使っておけばよいだろう。私も以前は74シリーズをふんだんに使っていたのだが、PLDを使うようになってからはほとんど使わなくなった。

(2) 基板

試作機を作るときには0.1インチごとに規則正しく穴の開いているユニバーサル基板を使う。電源・グラウンドの配置が基板ごとにいろいろあるので、自分の回路に一番便利なパターンの基板を選ぶ。基板の選択は電源ノイズをかなり左右する。計算機が完成した後にノイズ対策で神経をすり減らさないためにも、基板はガラスエポキシ四層スルーホール程度の少し高級なものを使おう。ガラスエポキシ四層スルーホールというのは、材質がガラスエポキシで、基板の内部に電源面とグラウンド面が入っていて表裏合わせて四層構造になっており、一つ一つのピン穴は表から裏まで金属でコーティングしてあるという意味である。値段は大ききにもよるが数万円程度である。意外に高い。

(3) ソケット

ICに合わせてソケットを用意する。ラッピングするので、3回巻き用の足の長いものを使う。大ききにもよるが、DIPタイプのものは1個500～1000円くらいで、PGAタイプのものは1個3000～5000円くらいである。

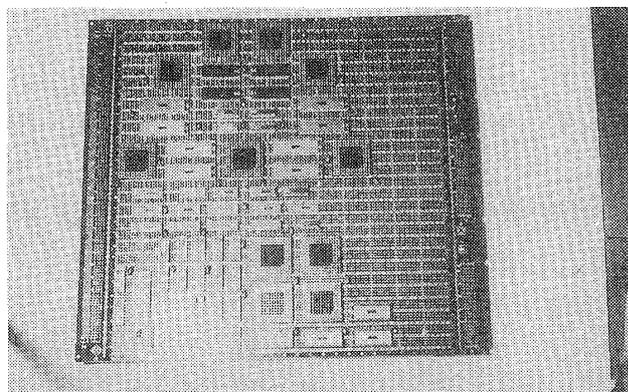


写真4 ユニバーサル基板(表).
ICソケットをはめ込んでいる。

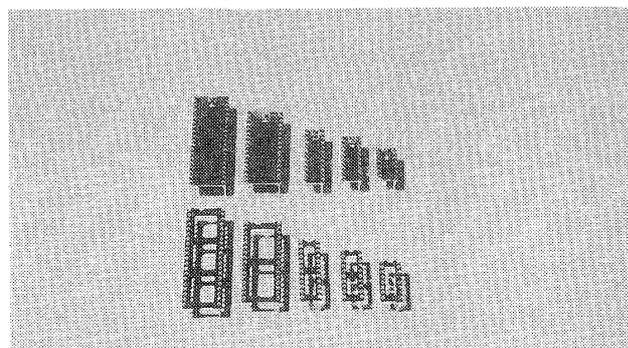


写真5 ラッピング用 DIP タイプ IC ソケット
(上はパソコン付きのもの)

(4) IDカード

ソケットを基板に差した後、裏側にかぶせて使うカードである。ピンに応じた番号がふってあり、これを目印に配線を進める。50枚あるいは100枚1袋で市販されている。1袋1000円くらい。

DIP タイプのものは各種そろっているが、PGA タイプのものは私は見たことがない。あればとても便利なので、よく探せばあるのかもしれない。

(5) コンデンサ・抵抗

コンデンサは主にノイズ対策用のパスコン (バイパスコンデンサ) として使う。0.1 μ F くらいのコンデンサを IC 1個につき1個程度、さらに10 μ F くらいのコンデンサを IC 10個につき1個程度の割合で基板に入れる。パスコンは各 IC に対してローカルな電源の役割をしていると考えてもらえばよいだろうか。デバッグしていてなかなかノイズがなくならないとき、パスコンを増やしてみたらノイズが劇的に低減したということもある。なかなか果たす役割は大きい。

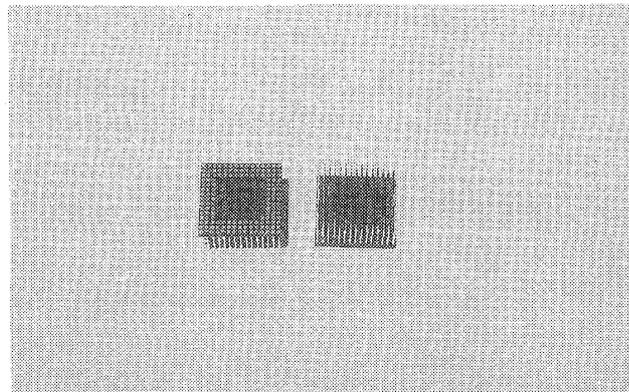


写真6 ラッピング用 PGA タイプ IC ソケット

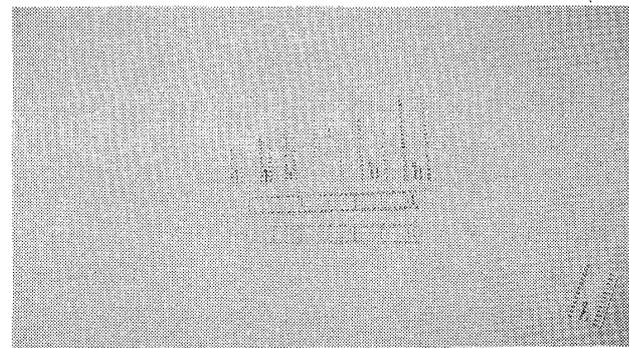


写真7 IDカード

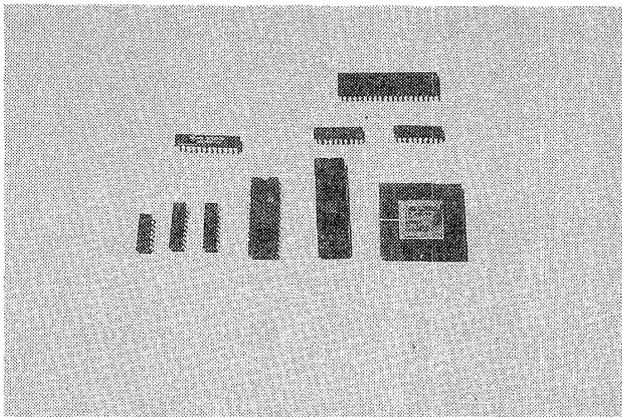


写真8 IC

抵抗は端子をプルアップするときなどに使う。ユニバーサル基板に合わせたピンタイプの抵抗アレイも市販されていて、それを使うと便利なことも多い。

コンデンサも抵抗も値段は数十円くらい。

(6) 電源

デジタル回路は5ボルトで動作するものなので、5ボルトの定電圧電源が必要である。電流値にもよるが、数千円程度からある。

(7) インターフェース関係

トータルな計算機システムを1から10まで手作りするのは大変なので、専用計算機はバックエンド・プロセッサとして開発するのが得策である。その場合、パソコンやワークステーションなどをホストコンピュータとして使用することになるが、両者をつなぐインターフェースが必要になってくる。インターフェースまで自作するのは大変なので、市販のものを買ってくるのがよい。専用計算機側はその規格に合わせてインターフェース部を作る。手を抜ける所はとことん手を抜く、そういう方針が私のおすすめである。

ワークステーションをホストコンピュータに使う場合、VMEバスをインターフェースに使うことが多く、またそれが便利である。1~10MB/sの転送速度が出る。しかし、少々高く数十万円から百万円程度する。ただしこれは一度購入すれば済むことなので、初期コストと考えてもらいたい。他のインターフェースも同様である。

パソコンをホストコンピュータに使う場合、

GPIOが手頃である。10万円もあればよい。転送速度は100kB/sくらいである。もし転送量が少なく転送速度は遅くてよいときにはRS232Cを使う。RS232Cはパソコンにもワークステーションにも標準装備されているので、初期コストはかからない。ただし転送速度はせいぜい2kB/s(19.2kbit/s)程度である。

だいたい1ボードサイズで単精度型の専用計算機を作ると、インターフェースの初期コストを除いて、材料費は50~100万円くらいになる。

最後にデータ・シートについても触れておかなければならない。ハードウェアの世界は近年目ざましく進歩している。その流れについていくためには何よりも情報を集めることが大切である。専門書を読むよりも雑誌の広告に目を通し、「これは」と思ったICや機器があったら、すぐに資料を請求することである。昨日できなかったことが今日になったら可能になっていたということも十分あり得るのである。

さて、何を準備すればよいのかをお話したところで紙面が尽きてしまった。続きは次回にしたい。今回はステップアップ編ということで、実際の製作を設計から完成まで流れを追って説明する。さらに、手作り専用計算機がスーパーコンピュータを越えるまでの道筋も示してみたい。

参考文献

- [1] 近田義広：科学 **54**, 649 (1984).
- [2] Y. Chikada, M. Ishiguro, H. Hirabayashi, M. Morimoto, K. Morita, H. Iwashita, K. Nakazima, S. Ishikawa, T. Takahashi, K. Handa, T. Kasuga, S. Okumura, T. Miyazawa, T. Nakazuru, K. Miura and S. Nagasawa, Proc. IEEE, **75**, 1203 (1987).
- [3] D. Sugimoto, Y. Chikada, J. Makino, T. Ito, T. Ebisuzaki and M. Umemura, Nature **345**, 33 (1990).
- [4] T. Ito, J. Makino, T. Ebisuzaki and D. Sugimoto, Comput. Phys. Comm. **187**, 60 (1990).
- [5] T. Fukushige, T. Ito, J. Makino, T. Ebisuzaki, D. Sugimoto and M. Umemura, Publ. Astron. Soc. Japan **43**, 841 (1991).