

# 特集

## 第1章

ソフト&ハード、両方知っててあたりまえ！



# ソフトウェア技術者のための LSI 設計入門

—— コンパイルと異なり  
論理合成・配置配線では試行錯誤が必要

下馬場朋禄，伊藤智義

ここでは、ソフトウェア設計の知識のある技術者を対象に、LSI の設計手順を紹介する。LSI の設計手順はソフトウェアの設計手順と似ている。モジュール分割を行い、各モジュールを設計・コーディングし、コンパイルし、統合してテスト(検証)する。ただし、LSI の設計では、おもにハードウェア記述言語(HDL)を使って回路の機能を表現する。また、コンパイラの代わりに論理合成ツールと配置配線ツールを使って最終的な回路データを生成する。なお、本記事で紹介したサンプルのHDLデータは、本誌付属のCD-ROM に収録されている。(編集部)

ここでは、ソフトウェア設計の手順と対比させながら、LSI 設計の実際についてお話します。類似点・相違点を実感していただき、ハードウェア開発に取り組む際の一助になれば幸いです。

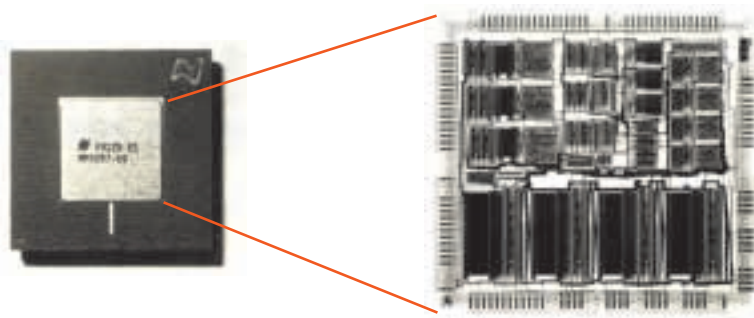
### ●ソフト化が進むLSI —— 汎用ロジック、ASIC、FPGA

筆者らはここ10年ほど、問題に応じたハードウェアを開発することによって、数値シミュレーションの速度を飛躍的に高速化する研究を行っています。最初に手がけたものは「重力多体問題専用計算機」の開発でした。銀河などのような多数の星で構成されている系のふるまいを調べるための計算機です(右掲のコラム「専用ハードウェアによる数値シミュレーション高速化の試み」を参照)。

その試作1号機は1989年に完成しました(写真1(a))。74シリーズの汎用ロジックIC(ANDやOR、NOTといった基本的な論理演算回路を内蔵するIC)を中心に、市販のALU(数値演算ユニット)やROM、RAMを組み合わせて作りました。当時は、一般的なハードウェアというものは、こんなふうになっていたように思います。電子部品代は数十万円で、使ったチップは全部で97個でした。



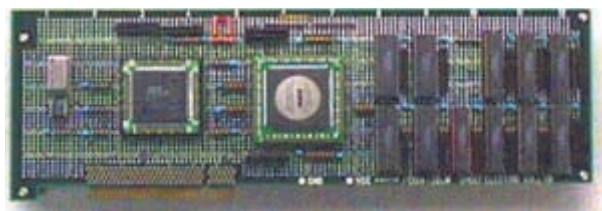
(a) 重力多体問題専用計算機 GRAPE-1 (1989年試作)



(b) 重力多体問題専用LSI(左側は外形、右はチップのマスク・パターン。1991年試作)

### 【写真1】ハードウェアの変遷

筆者らが開発した重力多体問題専用計算機。(a)は1989年に開発した試作1号機。汎用ロジックICやALU、ROM、RAMを組み合わせた。(b)は、(a)の数年後に開発したもの。自前で設計したASIC(専用LSI)を利用した。(c)は、2年ほど前に開発したもの。(a)の計算機をFPGAを使ってリメイクした。



(c) 重力多体問題専用計算機 GRAPE-1 をFPGAでリメイクしたFPGA-GRAPE (1998年試作)

それから数年たって、もっと高速化するためには回路を1チップ(LSI)化する必要があるということになり、専用LSIの開発を行いました(写真1(b))。試作1号機の回路の主要な部分をこのLSIのなかに組み込みました。研究グループの1人がデザイン・センタに通って設計を行い、半導体メーカーに発注して作りました。開発費用は数千万円でした。このように、ユーザが自ら設計し、半導体メーカーに製造を依頼する専用LSIのことをASIC(application specific integrated circuit)と呼びます。ちょうど、こうした専用LSIを作ろうと思えば作れる時代でした。さまざまな電子機器がASICを用いて小型化・高性能化していきました。

ASICの登場にともなって、ハードウェアの開発手法は大きく変わりました。それまでは、ICの組み合わせにおけるさまざまなノウハウ、たとえばある1個のICに接続できる別のICの数(ファンアウト数)はいくつなのか、といった知識が重要でした。それが、IC内部の論理機能の設計に重点が置かれるようになったのです。設計手法も論理記号(回路図シンボル)を組み合わせて作る回路図から、テキスト形式で機能を記述する方式に変わってきました。そこで使われるハードウェア記述言語(HDL: hardware description language)はビット操作の入ったC言語のようなもので、ハードウェア開発はソフトウェア開発のスタイルと類似したものになっていきました。

ただし、ハードウェア開発とソフトウェア開発には、まだ大きな違いがありました。設計したものを検証(テスト)する手法の位置づけです。ASICでは、一度シリコン・ウェハに回路を焼き込んでしまうと、ソフトウェアのように後から機能を書き換えることができません。そこで回路を焼き込む前に、設計した回路が本当に正しい論理機能を実現しているかを検証する作業が重要な位置を占めるようになりました。

すべての入力パターン(ICの入力ピンに与える信号パターン)をシミュレーションできるのであれば問題はないのですが、パターンの数が多すぎて、現実にはこれは不可能です。入力パターンの数は、入力ピン数の2乗に比例して増えます。デジタル信号の状態は‘0’と‘1’の2通りあるので、たとえば入力ピン数が100のチップがあったとすると、入力信号の組み合わせは全部で $2^{100}$ (約 $10^{30}$ )あることとなります(総あたりでチェックした場合)。現在、最速のスーパー・コンピュータでも1秒間に処理できる演算はたかだか $10^{12}$ 個程度(1年間で $10^{20}$ 個程度)ですから、たった1個のLSIを調べるのに数十億年もかかってしまうことになります。そこで、効率のよい入力パターンをどのように作るかということが重要になってきます。もちろん、ソフトウェアの開発でもこのようなテストベンチ(テスト環境)の構築は行われますが、ハードウェア開発ではより厳密な検証が求められるということです。実際、ASIC



## Column1

### 専用ハードウェアによる数値シミュレーション高速化の試み

計算機パワーの向上にともなって、さまざまな分野で数値シミュレーションが行われるようになってきました。このような研究ではふつう、ソフトウェアの開発が主であり、パソコンやワークステーション、またはスーパー・コンピュータなどの既存の計算機を使って計算を行います。筆者らはさらに一歩進めて、アルゴリズムの一部をハードウェア化することで数値計算を高速に行う方法を試みています。いわばハードウェアとソフトウェアを融合させた専用計算機システムの構築です。

ある種の数値計算ではそのような専用ハードウェアによるシステムが有効で、問題によっては価格対性能比で汎用計算機の1,000倍にもおよぶ高速化が達成されることもあります。その典型的な例が「重力多体問題」です。「重力多体問題」は、

計算すべきアルゴリズムは単純なのですが、その計算量が膨大で、筆者らが研究に参加した10年ほど前には、スーパー・コンピュータを使っても思うようなシミュレーションができない状況にありました。そこで開発されたのが重力多体問題専用計算機「GRAPE」です。

図Aに、GRAPEを使って得られた車輪銀河形成のシミュレーション結果を示します。この専用計算機によって、そのほかにも月の形成など、数々の天文学上の問題の解明が進んでいます。最新のGRAPE-6は東京大学の牧野淳一郎助教授のもとで開発が進められており、今年度中にはスーパー・コンピュータより100倍速い100T(テラ)flopsの演算能力に達する見込みです。



〔図A〕専用計算機GRAPEによる車輪銀河形成のシミュレーション

円盤状の銀河の中心に向かって小さな銀河が左から接近し(①)、衝突する(②)。小さな銀河はそのまま右に通過していく(③)が、大きな円盤状の銀河は衝突の影響で車輪の形に変化している(④)。実際に夜空で観測される車輪銀河はこのような銀河同士の衝突によって作られたという説に大きな根拠を与えたシミュレーション結果である。