

# SIGMA-1: データフロー スーパーコンピュータ

平木 敬

hiraki@is.s.u-tokyo.ac.jp

東京大学大学院情報理工学系研究科 教授

当時：電子技術総合研究所情報アーキテクチャ部



## なぜSIGMA-1は作られたか

私が電総研に入所した1982年には、計算機方式研究室の主なアクティビティはデータフロー並列計算機を中心としていた。メインフレームやベクトルコンピュータのクロック周波数が100MHz前後となり、計算機システムのさらなる高速化に並列処理が不可欠であるとの時代背景から、さまざまな形での並列処理アーキテクチャ研究が実用化へと立ち上がった時期でもあった。1982年は、偶然であるが第五世代計算機プロジェクト(ICOT)が発足し、並列処理を用いた人工知能の実現を開始した年でもある。

それ以前に完成した並列計算機は、実行制御自身が逐次的に解釈されるSIMD計算機を除き、いずれも規模が小さく、特殊なプログラミングが要請されるものであった。ILLIAC IV (1973, 16CPU), C.mmp (1975, 16CPU), CM\* (1980, 50CPU), HEP (1978, 16CPU) はこれらの代表例である。並列プログラミングの側面では、ベクトル計算機をターゲットとした最適化技術が利用可能となったものの、コンパイラによる自動並列化は遠い夢であり、また共有メモリに基づくマルチスレッディングはその萌芽も見られない時期であった。

データフローコンピュータは、プログラムをデータフローグラフで表現し、それを直接解釈実行することにより、データ依存関係だけにに基づく細粒度の並列処理を実現する。自動的なデータ依存関係の検出によりプログラムに内包されるすべての決定的並列性が利用

可能となること、プロセッサの実行モデル自身に相互通信が含まれることから、データフローコンピュータは汎用の数百、数千プロセッサの大規模並列システムを構築する基本方式として注目された。

SIGMA-1は、このような背景の下、データフローコンピュータにより最速の演算性能が達成し得ることを実証することを目的に研究開発されたデータフロースーパーコンピュータであり、1983年に製作が開始された。まず、1プロセッサのSIGMA-1プロトタイプ(図-1)が1984年に動作を開始し、それをLSI化した128プロセッサのSIGMA-1システム(図-2)は1988年に動作を開始した。

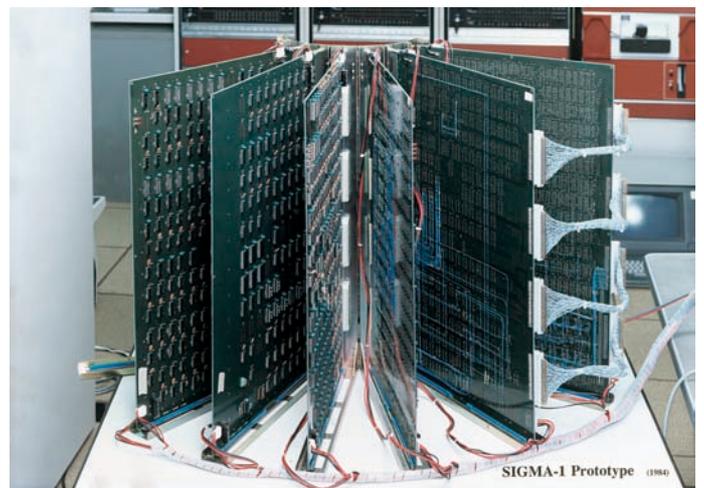


図-1 SIGMA-1 シングルプロセッサ・プロトタイプ





図-2 128プロセッサSIGMA-1

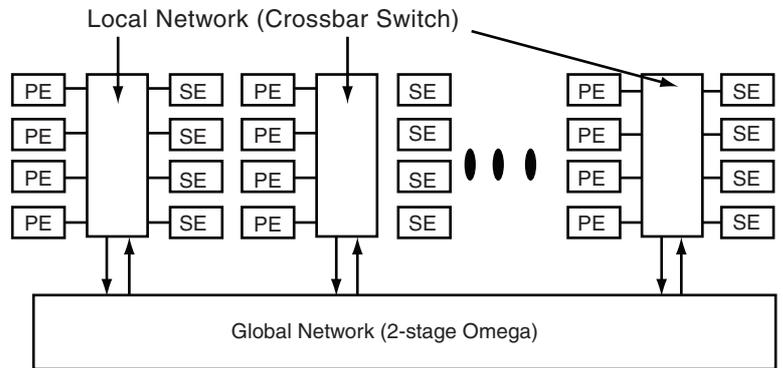


図-3 SIGMA-1全体構成

## SIGMA-1のアーキテクチャ

SIGMA-1は、タグ付きトークンを用いるダイナミック・データフローモデルに準拠する命令レベルデータフローコンピュータであり、128台のプロセッサ (PE) と128台のストラクチャ・ユニット (SE) をクロスバースイッチとオメガ網で構成される階層結合網で結合したものである (図-3)。図-4はPEおよびSEの構成を示す。PEはマッチングユニットにハードウェア化したハッシングを用い、マッチングの結果発火する命令について、順次命令読み出し、命令実行、出力パケットの生成を行う。SEはI-ストラクチャを拡張したものであり、PEからのメモリアクセスに対し、2ビットのタグを用いてデータ依存関係と関数性の保障を実現する。SIGMA-1構成の詳細は文献1)、2)を参照のこと。SIGMA-1の基本設計は、レイテンシ要素を小さくすることを重要な目的の1つとしている。具体的には、マッチングと命令読み出しを司る第1段と、命令実行とパケット生成を行う第2段で構成される短い2段のパイプライン構成を持つPE、パケット通信と実行の重複処理、クロスバースイッチとオメガ網で構成されるクラスタ化された全体構成によりレイテンシの短縮を実現している。この構成により、クラスタ内メモリへの読み出しアクセスに要する静的レイテンシが8クロック、クラスタ間メモリ静的レイテンシが14クロックである。なお、2入力命令

は3クロック以上の時間間隔で処理されるため、ローカルアクセスに約3命令時間、グローバルアクセスに約5命令時間が費やされる。命令の実行順序はすべてデータの到着順序で決定される。したがって2入力命令の入力パケット順序によるパイプラインバブル発生は動的要素により決定され、同一プログラムを再実行する場合も、さまざまな要因による命令実行順序の変化により実行時間は常に変化する。SIGMA-1処理装置は入力パケット順序によるパイプラインバブルおよび多出力命令における出力待ちの結果、1台あたりピーク性能で5MIPS、平均性能で約2.5MIPSの性能を持つ。

## SIGMA-1のソフトウェア

SIGMA-1のプログラミングはデータフロー言語DFCとDFC IIで行われた<sup>3), 4)</sup>。DFCはC言語を単一代入言語化したサブセットであり、DFC IIはDFCに構造体と制御構造の拡張を行い、単一代入言語の制限を緩和したものである。コンパイラはソースプログラムをデータフロー解析し、プロセッサにデータフローグラフのノードを割り付け、実行グラフ上のトークン回収に必要な同期操作を付加することにより実行用のデータフローグラフを得る。

関数性を保つため大域変数が使えないことを除けば、数値計算プログラムならば比較的自然にプログラムが可能であり、128PEの並列処理があっけないほど簡単に



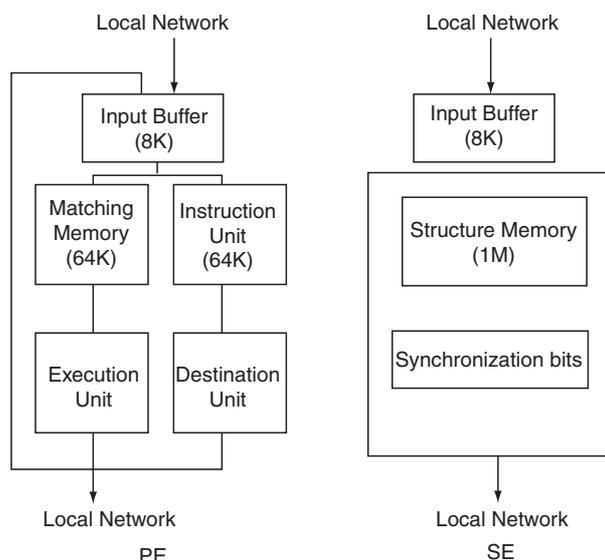


図4 SIGMA-1のPE/SEブロック図

実現する。プロセッサ間のレイテンシが並列プログラミングをいかに困難にしたかを実感した。SIGMA-1は研究用プロトタイプであったため、言語コンパイラ以外はすべてフロントエンドプロセッサに依存した。SIGMA-1の性能は文献5)に詳述されているが、128PEを用い、行列計算において117MFLOPSを達成した。

## おわりに

性能面から見ると、SIGMA-1はわずかではあるがCRAY-1を越す高速性を得ることができ、データフロー計算機が高速計算機たり得ることが示された。また、細粒度データフロー計算がプログラムの並列化に有効であることも示された。しかしながら、SIGMA-1を実用の計算システムへ発展させるための最大の障害が、並列度の制御と資源管理にあることが多くのプログラム経験から明らかとなった。すなわち、プログラムが内包する並列度は、そのすべてを引き出すのではなく、全PEを高利用率で利用するために必要な並列度を秩序を持って引き出すことが必要であり、データ依存関係に加え、発火可能な命令の発火にはスケジューリングと資源管理を組み合わせた制御が必要であることが示された。すなわち、データフロー実行モデルと逐次実行を含む制御駆動実行モデルは、対立する概念ではなく、協調すべき概念であり、並列実行の2つの基礎となる。この経験はSIGMA-1に引き続き開発されたEM-4、EM-Xに生かされ、データフロー実行と逐次実行の混合形態として確立した<sup>6)</sup>。

今日、メッセージパッシングを用いた並列計算、共有メモリ上でのマルチスレッド計算や並行オブジェクト指向計算が広く用いられている並列計算方式である。これらの計算機方式の実用化は、最適化コンパイラ技術の発展、共有メモリ、特に分散共有メモリ方式の発展、効率的マルチスレッド実行の実現に負うところが大きであるが、プログラムの自動的な並列実行やスケジューリング・資源管理の面では問題点を共有している。今後、チップ内大規模並列計算を実用化するために細粒度データフロー計算が用いられる時も遠くはないと感じている。

なお、SIGMA-1の研究開発は弓場敏嗣博士、島田俊夫博士、西田健二氏、関口智嗣氏と私が共同で実施し、ハードウェアの製作は(株)中央電子が担当した。SIGMA-1が動作し、所期の目的を達成できたことは研究開発を担当した方々の協力の結果である。心から感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) Hiraki, K., Shimada, T. and Nishida, K.: A Hardware Design of the SIGMA-1-A Data Flow Computer for Scientific Computations, Proc. Int. Conf. Parallel Processing, IEEE, pp.851-855 (1984).
- 2) Hiraki, K., Nishida, K., Sekiguchi, S. and Shimada, T.: Maintenance Architecture and Its LSI Implementation of a Dataflow Computer with a Large Number of Processors, Proc. Int. Conf. Parallel Processing, IEEE, pp.584-591 (1986).
- 3) 島田, 関口, 平木: データフロー言語DFCの設計と実現, 信学論(D), J-71-D, 3, pp.501-508 (1988).
- 4) 関口, 島田, 平木: 同期構造を埋め込んだSIGMA-1用高級言語DFC II, 情報処理学会論文誌, Vol.30, No.12, pp.1639-1645 (Dec. 1989).
- 5) Shimada, T., Hiraki, K. and Sekiguchi, S.: Evaluation of a Prototype Data Flow Processor of the SIGMA-1 for Scientific Computations, Proc. 13th Int. Symp. Computer Architecture, pp.226-234 (1986).
- 6) 弓場, 山口: データ駆動型並列計算機, オーム社 (1993).

(平成13年10月16日受付)

