

# コンピュータおよびLSI用 設計自動化システムの変遷

山田 昭彦

国立科学博物館産業技術史資料情報センター

a.yamada@computer.org

## ④ はじめに—設計におけるコンピュータの利用

1946年に最初のコンピュータENIACがペンシルバニア大学のムーアスクールで誕生して以来、コンピュータは技術計算や設計の分野に広く用いられてきた。ENIAC誕生から10年後の1956年に我が国最初のコンピュータFUJICが富士写真フィルムの岡崎文次により開発されたが、これはレンズの設計に用いられた。それまでは光線を追跡する大量の数値計算を行うのに対数表を用いて人手で行っていた。FUJICのクロック周波数は30kHz (MHzではない)であったが並列演算回路により乗算は高速化されており、人手の2,000倍の能力が得られたと報告されている。ENIACもFUJICも真空管を用いたコンピュータであるが、真空管式コンピュータの前にリレーを用いた計算機が開発されておりこれも設計に用いられていた。リレー計算機は計算速度が遅かったが、真空管により回路が電子化され計算速度は大幅に向上した。しかし真空管は信頼性が低かったためこれに替わる信頼性の高い素子が強く望まれていた。

1948年にベル研究所でトランジスタが発明され、内外でトランジスタコンピュータの試作が開始された。電気試験所でははやくも1956年に点接触型トランジスタを用いて2進法プログラム記憶式コンピュータETL Mark IIIが試作され、続いて1957年には実用機の10進法トランジスタコンピュータETL Mark IVが開発された。これをもとに国産商用トランジスタコンピュータが次々開発されたことはよく知られているところである。ETL Mark IVはその後Mark IV A (図-1)に改造され、1960年には入出力用コンピュータMark IV Bが開発された。このときMark IV B用の配線指令書はMark IV Aを用いて作成され、この報告が情報処理学会誌の設計自動化に関する最初の論文となった<sup>1)</sup>。つづいて1962年には電気通信研究所で商用トランジスタコンピュータを用いて設計自動化システムが開発され、課金用計算機の設計に適用された。その後コ

ンピュータメーカーでは第2世代の大型トランジスタコンピュータを用いて、第3世代コンピュータ開発のために本格的な設計自動化システムが開発されるようになった。

本稿では初期の1960年代から1980年代末までの設計自動化システムについて、システム形態の変遷と設計自動化技術の発展の両面から振り返ってみたい。初期の設計自動化システムについては電気学会論理装置の設計・製造自動化専門委員会が1970年に、つづいて情報処理学会計算機設計自動化研究委員会が1973年に報告書を発行している<sup>5), 6)</sup>。その後、情報処理学会電子装置設計技術研究委員会の調査結果をまとめた「論理装置のCAD」が情報処理叢書として1981年に発刊された<sup>7)</sup>。

## ④ システム形態の変遷<sup>10)</sup>

### バッチシステムによる設計自動化システムの発展

#### ■初期のシステム■

初期の設計自動化システムでは使用するコンピュータは能力も限られていたため、配線設計や論理シミュレー

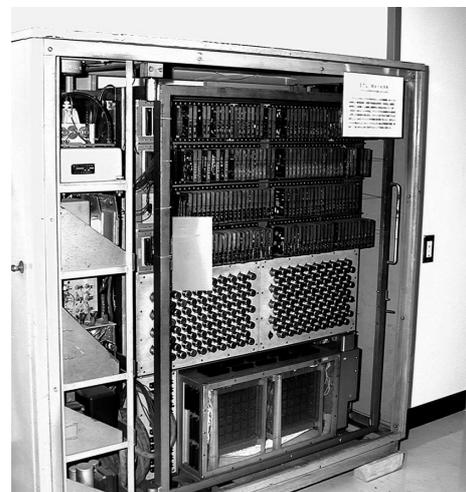


図-1 ETL Mark IV Bの設計に用いられたETL Mark IV Aトランジスタ計算機 (国立科学博物館所蔵)



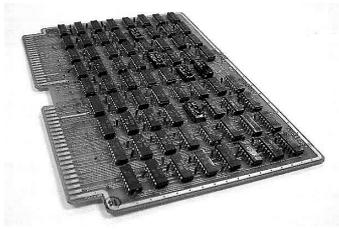


図-3 NEAC 2200 モデル 500 の IC 化パッケージ

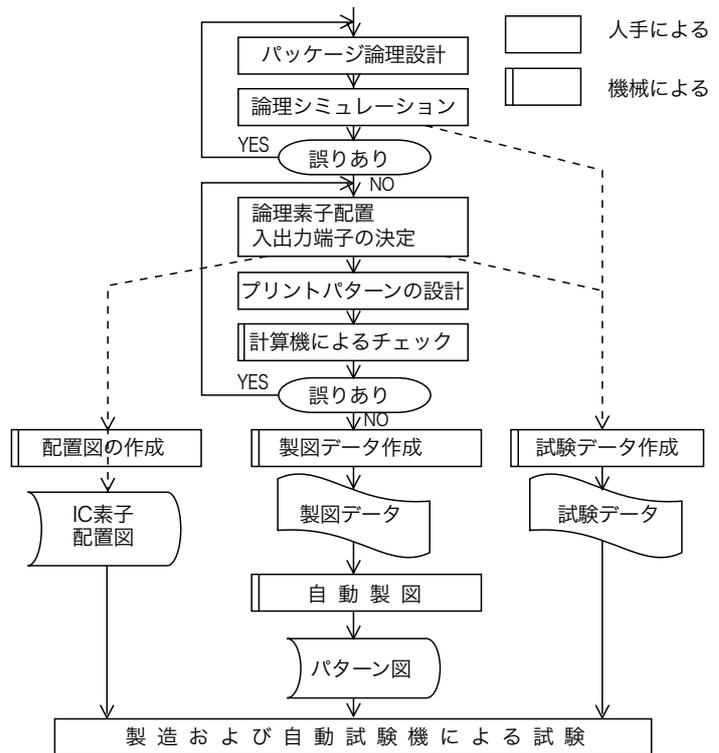


図-4 NEAC 2200 モデル 500 のパッケージ設計の流れ図 (文献 3) より)

230-50 による設計自動化システム DAS-2 が全面的に採用された。DAS-2 は論理シミュレーション機能や多層プリント配線の自動生成機能を持ち、設計・製造自動化を支援するトータルシステムとして構成された。

### ミニコンピュータによる対話型 CAD システムの登場

グラフィックディスプレイを用いた対話型 CAD システムについては、すでに 1963 年に MIT で発表されていたが、高価であったことなどから実用化にはつながらなかった。1965 年に DEC より 12 ビットのミニコンピュータ PDP-8 が発表され、ストレージ型ディスプレイ、タブレットと組み合わせると比較的安価な対話型 CAD システムの実現が可能となった。1960 年代の終わりには米国のアプリコン社などから、ミニコンベースのターンキー CAD システムが販売されるようになった。

我が国では 1976 年にシャープと大阪大学が 16 ビットのミニコンピュータをホストコンピュータとし、ストレージ型グラフィックディスプレイを用いたデジタル回路用プリント基板設計システムを共同開発している。このシステムはグラフィックディスプレイを介した対話型設計システムとして構成され、バッチ処理による自動配

線結果を人間が判断、修正し、再び自動配線ルーチンへ戻すフィードバック機能を備えていること、対話型配線修正処理により配線設計の一部変更に対応できることなどの特徴を持っていた。

LSI の設計ではグラフィックディスプレイを用いた対話型システムが 1960 年代後半から利用されている。当初は大型コンピュータとオンライン接続されたシステムが多かったが高つくため、ミニコンピュータを利用する安価なシステムに移行してきた。企業では LSI 開発用のツールとしてターンキー型 CAD システムの導入が次々行われた。グラフィックディスプレイによる対話型入力・修正機能のほか自動配置配線機能、チェック機能も有していたが能力的には不十分であったため、ディジタイザ入力、グラフィックディスプレイによる部分的な修正、ペンプロッタ出力、マスクデータの生成の形で使用された。

LSI の集積度が增大するにつれてミニコンピュータの能力では満足できなくなり、再び大型コンピュータとの結合システムに戻った。OLIMPIC (東芝, 1973) では大型コンピュータシステムとオンラインで中型コンピュータベースのグラフィックシステムを接続し、グラフィックディスプレイで LSI の配線パターンを修正した。

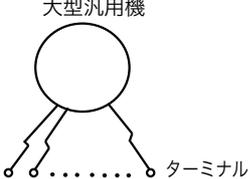
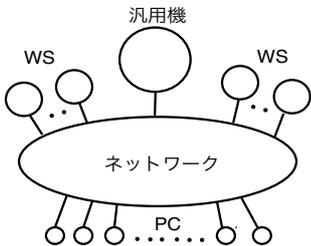
	1960年代	1970年代	1980年代
システムの形態	<p><u>バッチシステム</u></p> 	<p><u>タイムシェアリングシステム</u></p>  <p><u>スタンドアロンシステム</u></p> 	<p><u>分散処理システム</u></p>  <p>WS: ワークステーション</p>
グラフィックディスプレイ ポインティングデバイス	ベクトル型 ライトペン	ストレージ型 タブレット	ラスタ型(カラー) マウス
データベース	磁気テープファイル	磁気ディスクファイル	データベース

図-5 設計自動化システムの形態の変遷

マスタスライスLSI用のCAD75（日立，1976）では磁気テープによりオフラインでスタンドアロンシステムと配線データの交換を行い，グラフィックディスプレイ上での配線修正を可能にし開発期間を半減した。

### ワークステーションおよびパーソナルコンピュータの誕生

1973年にはゼロックスのPalo Alto研究所で先進的なワークステーションAltoが開発されたが，直接商品化にはつながらなかった。1974年には8ビットのマイクロプロセッサが発表され，これを用いてパーソナルコンピュータ(PC)が誕生した。

1980年には商品としてのワークステーションが誕生し，同時にワークステーションベースのCADシステムが発表され，VLSI設計用に導入されるようになった。32ビットマイクロプロセッサも1980年に発表され，ワークステーションにも採用された。当初のCISC型マイクロプロセッサでは処理能力がやや不足気味であったが，RISC型マイクロプロセッサの登場とともにワークステーションの高性能化が急速に進み，CADシステムの処理能力が大幅に向上した。また，使い勝手も非常によくなった。

ワークステーションは多数導入するにはまだ高価であったため，回路図入力用などには安価なPCが利用された。NECでは16ビットのPCを用いた回路図エディタVISTASを開発し，これをローカルエリアネットワーク

(LAN)に100台接続してスーパーコンピュータの設計入力に使用した。

1980年代後半にはワークステーションの高性能化，低価格化が進み，ワークステーションベースのCADシステムが普及した。CADワークステーションのネットワーク環境での利用も広まった。図-5にこれまでのシステムの形態の変遷を示す。

### 設計自動化技術の発展<sup>8), 9)</sup>

#### 論理設計

論理設計の自動化は早くから研究されてきた分野であるが，論理回路の自動合成は実現が非常に困難で，バベルの塔といわれていた。このため人手による論理設計の結果をコンピュータでシミュレーションすることによりチェックする方法がとられた。

#### ■論理シミュレーション■

論理シミュレーションによる設計のチェックを試みは1950年代から行われていた。1962年にイリノイ大学のS. Seshuはコンパイル方式を採用した論理シミュレータを開発したが，同じ年に我が国でも電気通信研究所でコンパイル方式の論理シミュレータLSSがNEAC 2203を用いて開発され，電電公社のCAMA大局課金用計算機CM-100の論理設計に適用された<sup>2)</sup>。電気通信研究所ではその後DEX-1号電子交換機用にHITAC 5020を用いて大



容量高速論理シミュレータを開発した。コンピュータの高性能化と並列処理手法の採用によりシミュレーション速度を従来の100倍に改善した。

レジスタトランスファレベル(RTL)のシミュレータも多数研究が行われてきたが、RTLからゲートレベルへの論理変換(論理合成)が実現していなかったこともあり、十分活用されるに至らなかった。NECではLSI化の進展にともなう論理装置の大規模化に対処するため、RTLレベルとゲートレベルの両者を扱える混合シミュレータMIXSを1970年代後半に開発し実用化した。日立でも両レベルの扱える論理シミュレータをLSI化された超大型機M200Hの開発に使用し、実機による検査期間を半減した。

1970年代に入りLSIのシミュレーションにゲートレベルシミュレータが適用されたが、精度を向上させるためにスイッチレベルのシミュレータが開発された。LSI開発用のミニコンピュータ版商用シミュレータも数多く販売され、1980年代にはワークステーション版の論理シミュレーションのほかシミュレーション用ハードウェアアクセラレータも発売された。

1980年代のVLSI時代に入りシミュレーションに対する高速化の要求がますます高まり、並列アーキテクチャを採用したシミュレーション専用のハードウェアが実用化された。1983年発表のNECのHALはゲートレベルのシミュレーションマシンで、並列処理とアルゴリズムのハードウェア化により高速化をはかっている。HALの場合、ソフトウェアシミュレータに比べて1000倍以上性能が改善されている。その後レジスタトランスファレベルのHAL IIIが開発されさらに1桁性能が改善された。富士通では80年代初めにベクトル型スーパーコンピュータVP200を用いたVPソフトシミュレータを開発したが、80年代後半には論理シミュレーション専用ハードウェアSP1を開発し、VPシミュレータの100倍以上の性能を達成した。

#### ■論理合成■

論理合成については古くから内外で多くの研究、開発が試みられていた。我が国においても種々の研究が行われ、東大の元岡研究室では5段階のレベル構造を持つ論理設計言語を用いた論理設計システムLDSが研究され1967年に発表された<sup>4)</sup>。レベル1は論理図、レベル2はブール式、レベル3はタイムチャート、レベル4は論理動作の実行順序、レベル5はマクロ記述に対応する。IBMではAPL類似の設計言語を変換してブール式を出力する論理合成システムALERTを1969年に発表したが、回

路規模が人手設計の160%増になることが判明し実用化に至らなかった。

その後論理設計自動化を目的とした実用システムの研究はしばらく中断したが、この間PLAを対象として積和形2段階論理の簡単化について研究が進み、すぐれた簡単化のアルゴリズムが発表された。マスクPLA、FPLAの進歩とともに論理式を入力しこれらの簡単化アルゴリズムにより積項数の最小化を行いPLAのパターンを生成するシステムが開発された。

一方、論理装置のLSI化の進展にともない多品種のLSIを短期間に開発する必要性が高まり、実用化を目指した論理合成システムの開発が再開された。1980年にIBMではルールベースによる局所の変換を用いた対話式の論理合成システムを実用化しLSI設計に適用した。

その後、多段論理回路の自動合成アルゴリズムの研究も2段階論理簡単化につづいて進展した。1970年代初期にイリノイ大学では許容関数を用いて簡単化を行うトランスダクション法が室賀三郎および上林弥彦(現京大)により考案され発表された。その後アルゴリズムによる変換を用いた論理合成システムについても各所で研究開発され、商品化も行われた。松永裕介(当時富士通、現九大)および藤田昌宏(当時富士通、現東大)は1989年に、BDDを用いて強力な多段式の簡単化を行うことにより、ALUのような複雑な論理関数を持つ回路も人手並みの設計品質の回路を生成できることを示した。

#### 実装設計・レイアウト設計

コンピュータの設計への適用は配線データの生成から始まっており、実装設計におけるDAが最も古い歴史を持っている。自動配線のアルゴリズムはC. Leeの迷路法が1961年に発表されているが、1968年に三上晃一・田淵謹也(当時三菱電機)により処理時間の速い線分探索法が発表され、我が国では迷路法と組み合わせるプリント配線の自動配線手法として広く利用された。

1971年にイリノイ大において橋本昭洋(現阪大)およびJ. StevensによりLSI用自動配線アルゴリズムとしてチャンネル配線法が提案された。UC Berkleyの吉村猛(現早大)、E. Kuhにより改良され、Yoshimura-Kuhのアルゴリズムとして1980年に発表され、広く用いられるようになった。

LSIレイアウト用のシステムについては、1976年にスタンダードセル用のLTXがベル研究所で、ビルディングブロック用ROBINがNECで開発され、その後多くのシステムが開発された。1979年には仕様記述から完全なLSI



マスク生成を目標とするシリコンコンパイラの提案が行われている。

## テスト設計・テスト容易化設計

### ■テスト自動生成と故障シミュレーション■

テストデータの自動生成については、J. Roth (IBM) によりDアルゴリズムが1966年に発表された。つづいて久保秀士 (NEC) によりDアルゴリズムの順序回路適用への拡張が1969年に行われた。その後アルゴリズムの面では目立った進展がなかったが、1980年にP. Goel (当時IBM) が排他的論理和を含む回路も効率よくテストを生成できるPODEMアルゴリズムを発表した。藤原秀雄 (当時阪大、現奈良先端大) はこれをさらに改良し数倍高速化したFANアルゴリズムを1983年に発表し、テスト自動生成の高速化が一気に進展した。

### ■テスト容易化設計■

テスト生成アルゴリズムの改良のみでは大規模回路、特に順序回路に対し高い検出率のテストデータを生成することが困難である。小林亮ら (NEC) は順序回路をテストデータ生成とテストのときのみ組合せ回路に変換して取り扱うスキャンパス方式を考案し1968年に発表した。スキャンパス方式はその後IBMも全面的に採用したことにより、この方式の採用が広まり、ボードレベルについてもテストを容易に実現するためバウンダリスキャン方式がIEEEで検討標準化された。

## 設計言語の変遷と標準化

ハードウェアをソフトウェアと同じように言語で記述して設計する試みは古くから行われていた。このためハードウェア記述言語は1960年代から開発され実際のシステムの設計にも利用されてきた。これまでのハードウェア記述言語の多くは、設計情報の入力手段としての言語か、機能設計やアーキテクチャの設計の段階での設計検証や性能評価のための設計記述言語であった。前者については、PCやワークステーションのグラフィックディスプレイより論理回路図の形で入力することが容易にできるようになったため存在価値はほとんどなくなり、EDIFのような単純な回路接続記述のみがインタフェースの記述として標準化された。後者の設計の初期段階での利用は古くから研究されてきたが、実際の設計にはなかなか適用されなかった。これは上位レベルで設計記述を行って設計を確認しても、下位のレベルへの変換は人手で行わねばならず再度下位レベルでの検証が必要であり、

設計変更を両レベルの設計データに反映しその間の一致性を確認することも容易ではなかった。

ハードウェア記述言語VHDLは1983年より米国国防省でADAをベースにして開発されてきたが、1987年にIEEE標準となった。民間ではシミュレーション言語であるVerilog HDLが広く使われていたがこれもその後IEEE標準となった。我が国では一時論理合成を志向して開発されたUDL/Iをハードウェア設計記述言語の標準とすることで検討されたが、VHDLとVerilog HDLがすでに国際標準となりこれらを入力とする論理合成システムが我が国でも広く使用されつつあったため、UDL/Iの標準化作業は中止された。NTTで開発されたSFLは論理合成システム“パルテノン”のための設計言語であるが、NTTにおける開発に使用されるとともに、パルテノンとともに教育機関に提供され、多くの大学で利用された。

## おわりに

1950年代後半から1980年代末までの設計自動化システムの変遷、自動設計技術の発展について概観した。この間のハードウェア技術の進歩はすさまじく、その回路規模と実装密度の増大、動作速度の高速化に対応すべく、その世代の最大のコンピュータを用いて設計自動化システムを構築し次世代のコンピュータ、LSIを開発してきた。その間に当初夢見た論理合成が実現し、機能レベルの設計言語で記述すればその後は自動的に設計が行われるようになった。現在研究開発が行われているアーキテクチャレベルからの自動合成、ソフトウェアの生成も含めたハードウェア/ソフトウェア協調設計が実現した暁にはさらに大きな発展が期待できるであろう。

### 参考文献

- 1) 刈 一博, 西野博二: 電子計算機の配線に関する自動データ処理, 情報処理, Vol.1, No.4, pp.213-218 (Dec. 1960).
- 2) 高島堅助, 津田宏明, 加藤満左夫, 戸田 巖, 中村 彰, 高山 由: 論理構成のシミュレーション・プログラム, 電気通信学会, 電子計算機研究専門委員会 昭和37年度第4号, pp.24-32 (1962).
- 3) 北村拓郎: NEAC-2200/500 計算機の設計における設計自動化, 信学会 電子計算機研究会資料 (1967).
- 4) 元岡 達: 計算機設計の自動化, 情報処理, Vol.8, No.6, pp.368-374 (Nov. 1967).
- 5) 論理装置の設計・製造自動化専門委員会 (編): 論理装置の設計・製造自動化, 電気学会技術報告, I-94 (1970).
- 6) 計算機設計自動化研究委員会報告 (昭和46, 47年度), 情報処理学会研究会報告, 73-1 (1973).
- 7) 樹下行三編: 論理装置のCAD, 情報処理叢書5, 情報処理学会 (1981).
- 8) 小特集: VLSIのCAD, 情報処理, Vol.22, No.8 (Aug. 1981).
- 9) 大特集: 論理装置のCAD, 情報処理, Vol.25, No.10 (Oct. 1984).
- 10) 山田昭彦: Design Automation 30年の歩み, 信学技法 VLD93-106, pp.63-70 (1993).

(平成14年12月2日受付)