

## 2。

## 新概念の集積システムを求めて

特集

岩田 穆

岩田 穆：正員 NTT LSI 研究所

A New Idea for System Integration. By Atsushi IWATA, Member (NTT LSI Laboratories, Atsugishi 〒243-01).

## あぶすとらくと

現在主流のLSI技術は20世紀末には種々の限界に近づくため、その進歩が鈍るであろうから、その先でも急速な進歩をもたらす新しい集積システム概念を求めて、情報処理原理、アーキテクチャ、回路、デバイス、材料に及ぶ広い視野に立った研究が必要である。新しい概念は、生体の情報処理原理や自然現象の法則を理解し、これらを自然に実現するアーキテクチャや機能デバイスの探索から生まれ、更に材料の性質を直接利用するような方法に進むであろう。これにより既存技術では実現できないような、超高性能や創造的な機能を実現することが目標になろう。

キーワード：生体情報処理、ニューラルネット、ポストデジタルLSI

## 1. はじめに

既存技術の延長上にはない新しい概念の集積回路を求めて、21世紀のために何を考えたらよいのかというテーマを設定して、ポストデジタルLSI (PDL) 研究会で種々の可能性を探索した<sup>(1)</sup>。まだ、混沌とした状態ではあるが、本特集に種々の考え方が集約されている。本稿ではPDLの課題提起と視点について述べる。

## 2. 主流技術の光と影

## 2.1 デジタルLSIの時代

20世紀の半ばに真空管に代って主役となったトランジスタと半導体集積回路は規模の拡大と同時に機能・性能でも長足な進歩を遂げた。マイクロプロセッサとメモリなどの汎用LSIのコストパフォーマンスが向上し、パソコンやOA機器などに大量に使用された。一方、ユーザの仕様に応じて少量でも低価格で実現できるASIC技術が進歩し、LSIの適用領域が拡大した。これらの技術はデジタル技術と連係して主流の座を獲得したのでデジタルLSI技術と

よぶことにする。

## 2.2 システム集積化は限界に近づく

デジタルLSI技術はサブ $\mu\text{m}$ 加工技術により21世紀初めに0.2 $\mu\text{m}$ 以下に達し、ギガビットDRAMや大型コンピュータを凌駕するマイクロプロセッサチップに到達するであろう<sup>(2)</sup>。しかし、この技術は成熟と同時に種々の限界に近付いて困難な課題に直面し始めている。この技術の限界に簡単に触れてみよう。

## (1) 情報処理原理は昔のまま

汎用のコンピュータはチューリングマシンの原理に基づき、ノイマン型アーキテクチャで実現された。これはデータとプログラムをメモリに記憶し、これを読み出して逐次処理する方法で、デジタル技術とLSI技術と協力して主流になった。しかし、以前から逐次処理の性能ネックが問題視され、これを打破する努力がなされている。ノイマン型の延長でパイプラインやマルチプロセッサ構成などの並列処理が研究されたが、実現の効率化やプログラミングの困難さのために充分な解決策には達していない。

また、ノイマン型はプログラムで動作するた

めにアルゴリズム化できないような処理への適用は不可能という欠点を持っている。

#### (2) デバイス・回路の性能は限界に

CMOS デバイスによる集積規模の拡大、バイポーラデバイスによる高速化が進展した。回路はバイナリー表現のブール代数に基づく2進論理回路とメモリが主体である。

デバイスの微細化や電源電圧の低下により回路当りの電力は低下するが、回路規模の増加と動作周波数の増加のため、チップの消費電力は増加する。また、デバイス自体の速度は向上するが、 $0.5\ \mu\text{m}$ 以下のライン&スペースの配線では遅延時間が増大して、チップ全体の速度を支配する。これを解決するために配線駆動の電力を高くする必要がある。つまり、消費電力でチップの集積規模と能力が制限される。

微細化に伴う電源電圧低下は信号の電圧や電荷量を低下させるので、SN比やノイズマージンは厳しくなり、設計が難しくなる。また、集積規模の増加に対してレントの法則に従ってピン数が増加して、これが集積規模を制限する。

#### (3) 設計・試験の時間が膨大化

デジタルLSIの設計・試験には完全性が要求されるので、大規模な回路全体について設計検証と試験が必要である。従って、設計工数はLSIの規模の2~3乗に比例して増加して、これが規模を制限する可能性がある。これに対して、従来の設計資産(モジュール)を積み上げる技術と、レイアウトや論理の設計を自動化して、設計を機能レベル以上に上位化する技術の開発が進められている。また、故障検出率向上とテスト時間短縮のためのテストビリティ向上技術も重要である。しかし、これらによる工数

の低減とTAT (Turn Around Time) の短縮が規模の増加に追い付くかどうかは厳しい状況である。

(4) デバイスは物理限界に、加工も限界に  
①スケーリングによるデバイス寸法の縮小と不純物濃度の増加による絶縁層の耐圧低下、接合のトンネルリーク、②加工寸法と不純物濃度のゆらぎによる素子精度の低下、③情報媒体である電子の数の減少に伴うゆらぎ効果による誤動作が物理限界として問題になる。

微細加工は波長の短い光(紫外線, X線)や粒子(電子, イオン)によるが、加工精度に限界がある。また、加工装置の大規模化などにより経済性の達成が困難になってくる。

#### (5) 信頼性の課題

微細化に伴いホットエレクトロンによるデバイスの劣化や配線のエレクトロマイグレーションによる劣化が問題になる。

### 3. ポストデジタルLSIの考え方

これまでのLSI技術の急速な進歩の先はどうか。デジタルLSI技術の限界を打破して、21世紀に主流となる革新的な概念を探索する必要がある。これをポストデジタルLSI(PDL)とよぶことにする。図1にデジタルLSIとPDLの年代進歩の様子と予想を示す。これを目指した新しい概念が必要な時期となり、本学会の時限研究専門委員会で研究が開始された<sup>1)</sup>。

#### 3.1 新しい情報処理原理とは

PDLに向けて、処理機能と処理能力の両面で既存技術の限界を破る新しい情報処理原理の探索が必要である。これを探索するためのヒントは生体と自然に存在するであろう。

新しい機能として重要なのは、所望の処理をアルゴリズム化することなく実現する機能であろう。更に新しい動作指針を形成する機能により、環境変化への適応、初めて遭遇した事態への対処を可能にすることである。これらの機能は生体では膨大な年月の進化の結果としてうまく実現されているわけである。

#### 用語解説

ハイパーカラム 大脳皮質表面に垂直な区画に同じ性質のニューロンが集まっている部分をカラム(円柱構造)とよび、視覚を扱う部分で、周期分の種々の傾きの線分に感ずるカラムの集まりをハイパーカラムとよぶ。

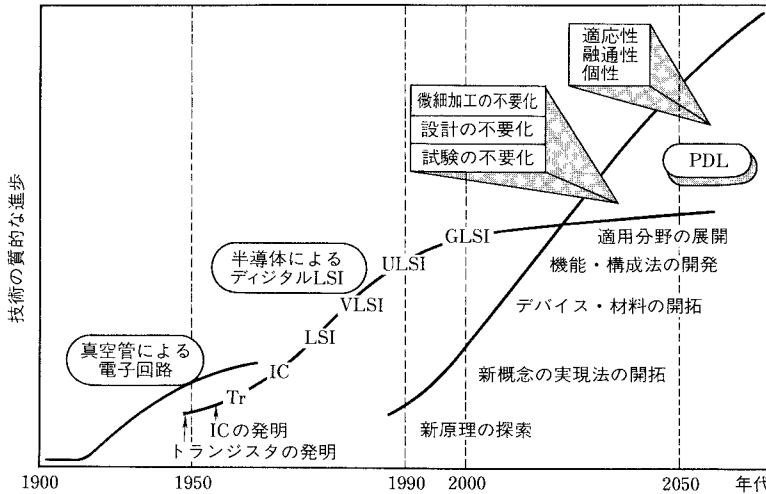


図1 デジタルLSIとポストデジタルLSI 既存のデジタルLSI技術と将来のポストデジタルLSI (PDL) 技術の年代進歩を示した図。現在の半導体デジタルLSI技術は、トランジスタの発明から50年を経て大きく進歩したが、技術の限界に近くなり技術的な進歩は飽和しつつある。この現状から数段飛躍するためには、新しい情報処理原理と新概念の実現方法が必要であり、これにより既存技術を乗り越え、急速な技術進歩を再来させるものがPDLである。PDLのための新原理が20世紀中に出現する可能性がある。

自然現象は超大規模な微分方程式を解くアナログコンピュータと見ることができる。この原理を素直にシミュレートすることにより困難な問題のソルバーが実現できる。

処理能力については、生体ではLSIに比べて5~6けたも遅いデバイスを使っているにもかかわらず、画像処理では高速コンピュータより高い処理能力を備えている。これは並列動作のおかげである。

### 3.2 アーキテクチャの革命

ノイマン型のネックを破るために、膨大な数の処理ユニットを同時に動作させる超並列アーキテクチャと融通性のある柔らかいアーキテクチャが重要であろう。プログラム制御から脱却したデータ駆動型や、疎結合マルチプロセッサによる分散処理など種々の研究がある。また、マルチポートメモリ構成や通信制御構成などハードに近い研究も多い。しかし、次世代の本命としての地位は得ていない。

生体をモデルとするニューラルネット<sup>(3)</sup>は多数のニューロンを相互結合した大規模なネットワークである。各ニューロンは簡単な電子回路

でモデル化される均一な機能を持っており、このニューロンが自律的に並列動作して超並列処理を効率的に実現する。更に重要なことは、各ニューロンは常に学習して外界に適応する柔軟性を持つことである。また、これはフォールトトレランスにもつながる。ニューラルネットをLSI化するとき規則的構造であるのでランダム論理に比べて設計が容易である。また、ニューラル処理の本質は速度ではなく、規模であるので、制限を破る低電力化も期待できる。

従って、ノイマン型のネックはニューラル情報処理原理によるニューロコンピュータによって解決される可能性を持つ。このようにニューロはPDLの有力な候補といえよう。

ニューロコンピュータのほかにホロンコンピュータ<sup>(4)</sup>がある。生体のハイパーカラム<sup>(5)</sup>の構造と共振現象を模擬して発案されたもので、ホロン素子として配列された非線型振動子の相互作用により、内部に協調と抑制状態を作り、これを情報の特徴と対応づける。経験した状態を知識あるいは概念として記憶させれば認識機能を持つ。未知の入力に対して新しい概念の形

成も可能と考えられている。ホロンは既存の回路では効率的に実現するのは難しいが、うまい実現方法を発明すれば期待される概念であると考える。

3.3 新しい実現方法とは

(1) 機能デバイス

新しい情報処理原理の実現に向けた新しい機能デバイスが要求される。例えば人工ニューロンの実現には多入力のしきい値デバイスが適する。ニューロンの可塑性を実現するには、学習により特性が変る機能とこれを記憶する機能を持つデバイスが必要である。これらはデジタル技術でも実現できるが、極めて多数のデバイスが必要で効率が悪い。一つの素子でこのような機能を実現することが目標になる。

(2) 量子デバイス

ナノメータ級の極微細構造で生じる量子効果、人工的超格子構造で生じる波動干渉効果などを利用したデバイスが考えられている。これらには超高速動作を指向するものが多いが、超

高速コンピュータには使えても身近で知覚の情報処理などを経済的に実現するのには向かないであろう。新しい情報処理原理に整合した機能の実現を目指したデバイスというより nm オーダの極微構造が重要であろう。

(3) 光デバイスの融合

限界に近く集積した LSI に光デバイスを共用することにより、LSI の性能を大幅に向上できるであろう。特に消費電力による処理能力限界の打破に有効であろう。また、電気の配線の帯域制限、超高密度配線ピン数のネックの解消にも有効であろう<sup>(9)</sup>。

(4) 機能材料

物理法則に基づく材料の性質を直接利用した情報処理も考えられる。汎用コンピュータとは行かないが、自然現象のシミュレーションからスタートすると手がかりが得られそうである。そのためには遺伝子工学などを活用した材料合成技術が必要であろう。材料は半導体材料から他の無機材料、有機材料へと広げる必要がある

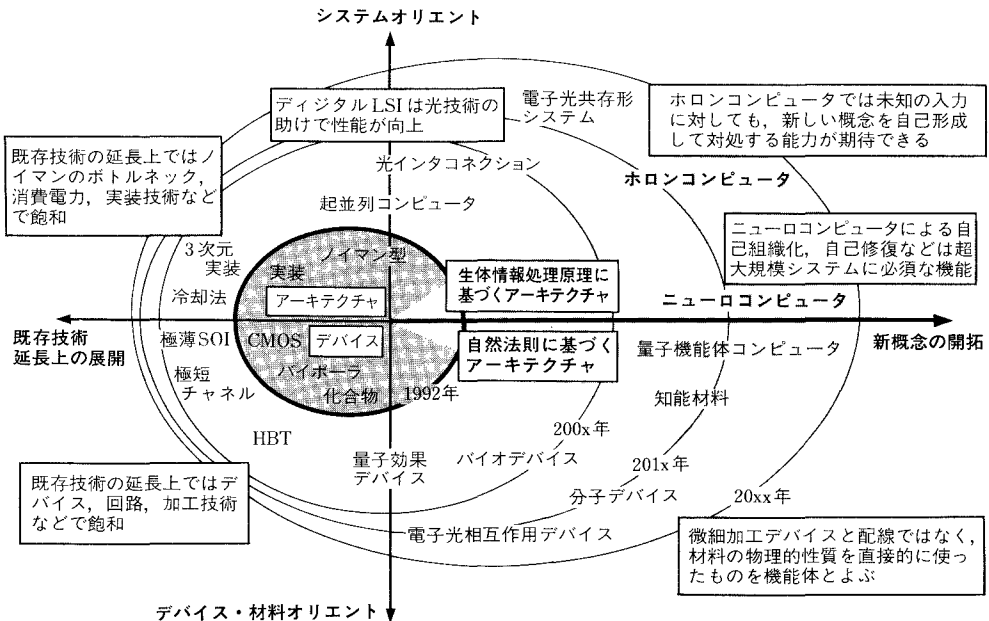


図2 新概念集積システム (PDL) に向けた研究の方向 技術開発の方向付けを表す図。左は既存技術の延長上、右は新概念のPDL、上はアーキテクチャ、下はデバイス、材料オリエントな軸。新概念の集積システムを目指す研究のベクトルの向きはできるだけ右に向けることが重要。そのためには情報処理原理の実現という目標を持つことが重要。

う。情報担体も電子のみでなく光子、原子、分子へと広がり、これらが複合化されるようになる。

新概念の集積システム“PDL”に向けた研究の方向を図2に示す。デバイスや材料の研究には現象や性質の解明のみではなく、情報処理原理やアーキテクチャのアイデアの実現に向けた合成的なアプローチが必要となっているのである。

#### 4. PDL ができたらどうなるのか

##### 4.1 エラーや故障が許容される？

すべてが完全に動作しなくてもよいような構成法の活用により、設計にエラーがあっても、また、一部のデバイスが故障していても使えるようになる。これにより既存技術では膨大化するLSI設計やバグ修正の時間とコストがかからなくなり、開発の期間も大幅に短縮される。また、LSIのコストを支配してきた歩留りの概念と、信頼性の概念が変り、超大規模な集積システムが可能となるであろう。

##### 4.2 設計が不要になる？

冗長性の高い情報処理の構成法や、必要な機能をなんらかの形で効率よく自己組織化する方法が実現できるので、現在膨大な手間がかかる理論とレイアウトの設計が不要になる。また、自己診断、自己修復の機能が達成されるので、LSI試験が不要になる。

この概念が有効になるためには既存の設計を大きく変革する必要がある。つまり、実現したい機能や仕様をどのように表現するかにまで立ち返って考えなくてはならないであろう。

##### 4.3 微細加工が不要になる？

Si上で膨大な数のトランジスタを配線ですぐとといった現在の集積回路を越える概念が主流になるので、サブ $\mu\text{m}$ のデバイスや配線を形成するための微細加工は不要になる。例えば、自己組織化のための情報を持った材料となる物質が情報処理や情報伝達の機能を実現してくれるであろう。

#### 4.4 LSI が個性を持つ？

PDLは融通性が高く、世界で一つしかないパーソナルなLSIを実現しうる技術である。例えば、使用しているうちにユーザの好みに合わせてくれる。更に進めて想像すると、進化するLSIもできるかもしれない。ここまでくるとこのような人工的なものが人間の味方でいてくれるかという危機感さえも感じられてくる。

これらの革新的な概念や技術を創造するためには、物理学、化学、数学、心理学、哲学など科学とエレクトロニクス、ホトニクスなど工学の分野を結合させる必要がある。LSI屋が生体情報処理を勉強してニューロチップを研究したり、生理学者がニューロチップを使って生体のモデルの研究を行うのはよい例であろう。

#### 5. む す び

新概念の集積システムとして、ポストデジタルLSIについてを述べた。この研究は先の長い仕事であり、すぐに成果がでるものではない。今後、百年の計を考え、短期的な技術開発のみでなく、新しい概念で世界をリードしたいものである。そのためには異分野の研究者が交流できる場を増やすことが重要であろう。

#### 文 献

- (1) PDL研究会資料：①21世紀の集積回路技術（現状技術の限界とその先）(1990-01)、②新しい集積回路の原理を探る（自然態の情報処理方法）(1990-09)、③バイオコンピュータ (1991-06)。
- (2) Gelsinger P.P., et al.: "Microprocessor Circa 2000", IEEE Spectrum, p.43 (Oct. 1989)。
- (3) ニューラルネット理論とその応用小特集, 信学誌, 73, 7, pp.679-723 (1990-07)。
- (4) 清水, 山田: "ホロンコンピュータの原理とホロビジョン", 信学誌, 70, 9, pp.921 (1987-09)。
- (5) 岩田: "シリコンと化合物集積回路の将来", 1990信学秋季大会, SC-9-2, 5-295。



いわた あつし  
岩田 稔 (正員)

昭43名大・工・電子卒。昭45同大学院修士課程了。同年電電公社武蔵野通研入社。以来、通信用LSI、信号処理LSI、ASIC、ニューロチップの研究に従事。現在、NTTLSI研究所プロセス自動化研究部長。著書「VLSIのためのアナログ技術」(共著)など。