

5. LSIとシステムーその融合と発展

日本電気株式会社 金井久雄
Hisao Kanai

はじめに

最近の情報処理システム，通信システム等のデジタルシステムの急速な発展は衆知のとおりである。そのなかで集積回路技術の進歩，すなわち，より高度なLSIの発展がシステムのハードウェアに与えたインパクトははかり知れないものがある。

現状ではさらにLSIが単にハードウェアに効果を与えるだけでなくシステム構成そのものに大きな影響を及ぼしつつあると共に，システムがLSIの内容と技術の内部に滲透しつつある。

このような動向にたいしてそれを技術開発の方向としてとらえ，具体化するためには，その根拠を技術的に理解することが望まれる。デジタルシステムはきわめて多種にわたり，しかもそれぞれのハイアラーキの中が極めて大きく，情報処理システムの例をとってみても，端末，パーソナルコンピュータ，オフィスコンピュータ，ミニコンピュータ，小形，中形，大形から超大形まで展開されている。したがってLSIとシステムとの結びつきにたいして両方を包含した設計思想を持たなければならない。

これまで筆者はデジタル系システムの集積化開発プロジェクトに参加してきたが，その過程において回路設計手法の研究を続けてきた。今回“LSIとシステム”のテーマについてその考え等にもとづいて考察した内容についてお話してみたい。その内の主な項目をあげれば次のとおりである。

1. コンピュータ技術の可能性
2. デジタル回路のとらえ方
3. コンピュータシステムの目標
4. 集積化技術の特徴と発展
5. LSI化システム
 - 5.1 システム LSI
 - 5.2 プロセッサシステムの LSI化
 - 5.3 LSIとソフトとの結びつき
 - 5.4 LSIとC & C ネットワーク
 - 5.5 LSIとマン・マシン・インタフェース
6. 情報処理におけるシステム LSIの例
 - 6.1 小形システム用
 - 6.2 大形システム用

1. コンピュータ技術の可能性

現代のコンピュータとコミュニケーションの技術に無限の可能性がある。即ち
(1) コンピュータはソフトウェアとハードウェアで構成される。

ソフトウェア-実行させたいこと
ソフトウェア-実行させる

> この両者が命令により結合

この基本構成〔両ウェアに分離し命令で結合すること〕により人間が機械で実行させたいことを記述すれば必ず実行させることができる。

(2) コミュニケーションはそのデジタル化により時間と空間とを起えうる手段を実現

このコンピュータとコミュニケーションとの結合によるシステム C & C は、そのシステムを利用する人々にたいして“いつでも” “どこでも” “だれでも” “なんでも” 実行させることの可能性を持っている。

この可能性を実際にひき出し商用化するときの一つの大きな課題に直面した。
すなわち

デジタル構成のハードウェアは、スイッチと接続による機能回路を積みあげたもので、ハードの量が大きく質が要求される。また実行させたい内容がシステムの高度化、大規模化、便利さの増大にともなってシステム構成上、システム利用上のソフトウェアの量と質の増大が要求されている。

これらの高品質で経済的に実現することによって C & C システムの無限の可能性を切り拓いてゆくことが技術者の使命であり、それを具体化する技術こそ将来につながる技術といえることができる。

集積回路技術の SSI → MSI → LSI → VLSI → への進歩は

この課題を解決する最も有力な手段であり、そこに システムと LSI との結合がはかられる所以がある。

2. デジタル回路のとりえ方

一般にデジタル回路とアナログ回路の設計・手法を考えると、両者の間に次のような差があることが見出される。

	<u>アナログ回路</u>	<u>デジタル回路</u>
素子	linear	non linear
現象	steady	transient
蓄積エネルギー	multiple	single

すなわちアナログ回路の設計手法の多くはその回路内の素子を線形とし、特性値を現象が定常状態になったものとして取扱っている。これにたいしデジタル回路ではその内部に必ずスイッチなどの非線形素子をもち、かつその特性値は回路の“遅延時間”という過渡現象内であらわれるものである。したがって線形と定常値を前提としたアナログ回路の設計手法をデジタル回路に用いることは不可能であり、非線形と過渡値の条件がデジタル回路の設計を複雑かつ困難なものとしている。

しかしデジタル回路ではその解析と設計に救いとなる大切な条件がある。そ

これは「デジタル回路を構成するスイッチング回路内の蓄積エネルギーの種類が単一とみなされるべき条件」である。その理由はもしも複合系であるときは回路の過渡現象にリングングが発生しやすく回路の遅延時間や雑音に悪い影響を与えるためである。

以上の考察からデジタル回路の設計手法としてアナログ回路の手法と異った新しい手段を見出す必要がある。いまデジタル回路の構成単位であるスイッチング回路の基本特性としてその遅延時間 T をとりあげ、単一エネルギーという条件で次元式を示せば次のとおり

$$[T] = \frac{[Q]}{[I]} \dots\dots\dots (1)-1, \quad [T] = \frac{[\Phi]}{[V]} \dots\dots\dots (1)-2$$

この両式は物理現象の式としては正しいがデジタル回路として必要な“論理振巾”の項が入っていない。この点を考えに入れれば次の式となる。

$$[T] = \frac{[Q][V]}{[I][V]} = \frac{[E]}{[P]} \dots\dots\dots (2)-1$$

$$[T] = \frac{[\Phi][I]}{[V][I]} = \frac{[E]}{[P]} \dots\dots\dots (2)-2 \quad \rightarrow [T] \equiv \frac{[E]}{[P]}$$

すなわちデジタル回路の設計では「蓄積エネルギーのしきい値を電力で駆動する」現象でとらえて設計手法を考えることが大切である。この基本にもとづいて展開した設計手法を「電力理論」と名づけた。⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾

解析の結果から

単一回路	$T_{pd} = U_{av} / P_{av}$	U_{av} : 回路の等価エネルギー P_{av} : 回路の電力
機能ブロック	$T_{pd} = U_B / P_B$	U_B : 機能ブロックの等価エネルギー P_B : 機能ブロックの電力

を求めることができる。高速の回路を得るためには、 U_{av} 、 U_B を小さくすることすなわち

“低エネルギー化”

が重要である。そのためには素子、接続の微細化と電力駆動の効率化などが大切であり、また機能あたりのエネルギーの小さい電子回路構成、論理回路構成を使用する。

今一つ大切なことは熱系を設計に導入することである。電力はすべて熱に変わり温度上昇 θ_B の原因となり、故障率と密接な関係をもつ。機能ブロックの等価熱抵抗を $R_{\theta B}$ とすれば

$$\theta_B = R_{\theta B} P_B \quad (5)$$

以上の論理・電磁系の(4)式と、熱系の(5)式とを用い、電力と幾何学的寸法を主パラメータとして両系にわたって回路の最適化を求める手法が考えられる。そのためには、回路の性能をどのように考えるべきかが必要である。

3. コンピュータシステムの目標

コンピュータシステムの目標は，そのシステムがフィールドに設置されて
“使用する人々に奉仕するシステム” である。

I. システムの性能は“いかに高速に動作するか”ではなく，“そのシステムがユーザにわたってフィールドで実際に発揮される働き”で定義されるべきである。

このように考えた性能を電力理論で定量化した結果次のとおりである。性能は

- (1) 機能ブロックの処理能力（プロセッサでは命令の処理速度）
- (2) 機能ブロックの信頼性

の結びついたもので表わされる。この考えに立って機能ブロックの性能を定量化したものを(PF)とし，その値を

(PF) = 単位時間当り実行する論理機能の平均回数とその論理機能の積とすれば

$$(PF) = \frac{1-b\lambda}{T_B} \times \text{論理機能} \quad (6)$$

T_B : 論理機能の実行時間

b : 故障発生時の平均実行修復時間

(物理的な修復時間だけでなく故障発生によるユーザのジョブに与える実効的影響の時間遅れを含む)

λ : 故障率 $\div \lambda_0 \exp(a\theta_B)$, λ_0, a : 定数

θ_B : 故障率と関連する温度上昇分 ($\theta_B \ll$ 平均絶対温度 ($^{\circ}K$))

この(6)式に，論理電磁系の(4)式と熱系の(5)式を代入すれば

$$(PF) = \frac{\theta_B(1-b\lambda_0 \exp(a\theta_B))}{\frac{U_B \cdot R\theta_B}{\text{論理機能}}} \quad (7)$$

代表例としてプロセッサをとりあげれば，論理性能にあたるものが“命令”となり

$$(PF) = \frac{\theta_B(1-b\lambda_0 \exp(a\theta_B))}{\frac{U_B \cdot R\theta_B}{\text{命令}}} \quad (8)$$

(PF)すなわち働きを最大とするためには

- ・命令あたりの $U_B \cdot R\theta_B$ を小さくする。即ち低エネルギー化，低熱抵抗化，最適化，
- ・ a, λ_0, b を小さくする。即ち低故障率—高アベイラビリティ化
- ・分子が最大となる温度上昇 θ_B を求め，それに対応した電力 P_B を設定する。

II. システムの経済性のためには，ディジタルハードウェアを構成する多数の素子と接続のコスト低減をはからなければならない。このためには個々に作り，個々につなぐのではなく，バッチ化すなわち，各製造工程において同時に多数の素子接続を構築してゆくことである。

以上の I と II の目標に関連する技術に素子技術，実装技術，回路技術があるがこれらを総合化してこのよりよいシステムを実現するための“構成”とその技術の方向が

“より高度の集積化構成にもとづく LSI 技術” である。

4. 集積化構成と技術の特徴

集積化構成は「回路を集積化する構成」である。すなわち

回路 = 素子と接続で機能を生むもの

集積化 = 素子と接続の一体化

であり、この両者をつ結びつけたものと考えることができる。この内容が今後どのように発展するかは別として、現在の集積化構成は、プリント配線板に発した2次元接続配列と半導体に発した2次元素子配列にもとづいており

基板の上に素子と接続を2次元的に構成したものである。その代表が次の三つである。(一般にプリント基板は入れていないがここでは広義に解釈して一緒に示した。)

半導体集積 - シリコン等の半導体基板上に構成

膜素子, 膜接続
半導体素子, 素子間分離
基板(シリコン単結晶ウェハ)

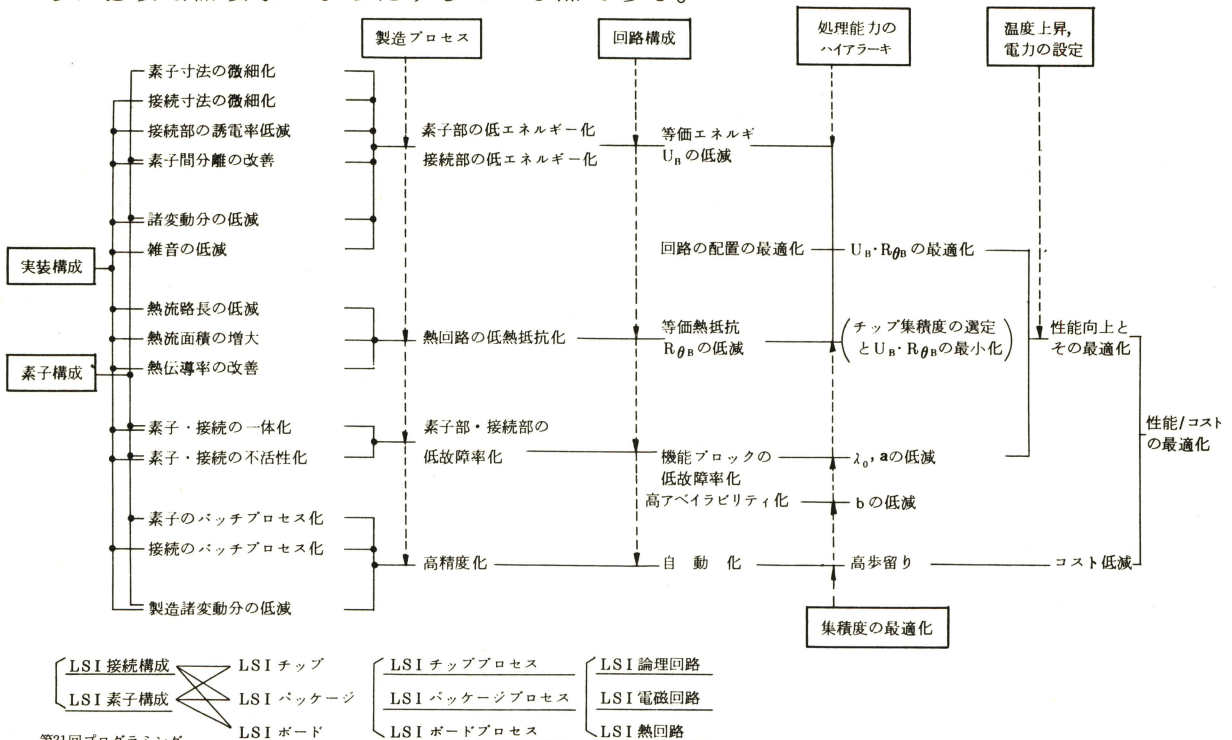
膜集積 - セラミック, ガラス等の絶縁基板上に構成

膜素子, 膜接続+個別素子, IC素子
基板(セラミック, ガラス)

プリント配線板 - 有機絶縁基板上に構成

膜接続
基板(プラスチックラミネート板)

集積化構成にもとづく技術の特徴は、まさに前節で述べたシステムの目標のために必要な諸要求にびったりしている点である。



5. LSI化システム

5.1 システム LSI

「ソフトウェアとデジタルハードウェアよりなるプロセッサ」が無限の可能性をひめているが、その可能性をシステムと結びつけ、現代の情報処理・通信システムの発展をもたらしたものがLSIである。

すなわちこれまで「可能ではあるがそのためには急増するハード量，ソフト量をいかに経済的に高品質に手にするか」という課題がLSI技術で対処された。

集積回路が小規模の時に部品として取扱われ，システムは部品として利用する考えが多かった。しかし，前述のように

集積化技術とはシステムの目標達成のための手段

であるとする基本に立てば，システムに直結するものとしてシステム指向で設計されるべきである。したがってIC, LSI, VLSI という語は本来システムIC，システムLSI，システムVLSIと呼ばれるべきである。

一般にLSIには，汎用品とカスタム品の2つの区分がなされている。これらはいずれも最終的には，システムを構築するために使用されるものであり，本来システムの最適化をベースに開発・設計される“システムLSI”である。

機能構成からみたLSIの主な区分例

論理機能 LSI	メモリ LSI
プロセッサ LSI	メモリ & 論理 LSI
マルチプロセッサ LSI	ファイル LSI
プロセス & メモリ LSI	
F/W化 LSI	インタフェース LSI

論理系の進歩 (価格の低減はシステムとして見る必要がある。)

エネルギー/ゲート	$\mu\text{J} \rightarrow 100\text{PJ} \rightarrow 50\text{PJ} \rightarrow 10\text{PJ} \rightarrow 1\text{PJ} \rightarrow \text{Sub PJ}$
機能	ゲート \rightarrow 制御ブロック \rightarrow プロセッサ \rightarrow メモリ付プロセッサ \rightarrow マルチプロセッサ \rightarrow
集積度	数ゲート $\rightarrow 10 \sim 50 \rightarrow 100 \sim 200 \rightarrow 500 \sim 1000 \rightarrow 1000 \sim 10,000 \rightarrow 10,000 \sim$
高速性/ゲート	$\mu\text{s} \rightarrow 100\text{ns} \rightarrow 10\text{ns} \rightarrow 2 \sim 4\text{ns} \rightarrow 1 \sim 2\text{ns} \rightarrow 0.3 \sim 1\text{ns} \rightarrow$
<u>メモリ系の進歩</u>	(価格の低減は衆知のとおりである。)
主メモリ (NMOS)	144b \rightarrow 1kb \rightarrow 4kb \rightarrow 16kb \rightarrow 64kb \rightarrow 256kb \rightarrow
高速メモリ速度	100ns \rightarrow 30 \sim 80ns \rightarrow 10 \sim 20ns \rightarrow 10ns \rightarrow

5.2 プロセッサシステムのLSI化

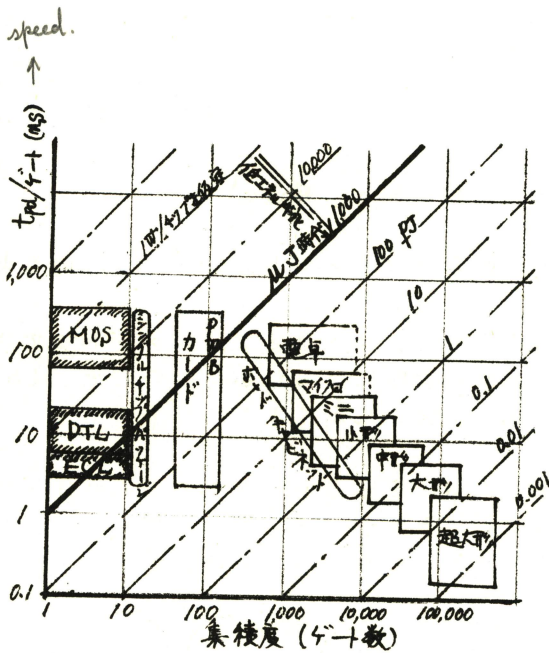
LSIのなかにシステムの性能をどのように入れこむかは

LSIの $U_B \cdot R_{\text{OB}}$ 積 \leftrightarrow システムのハイアラキーの対応

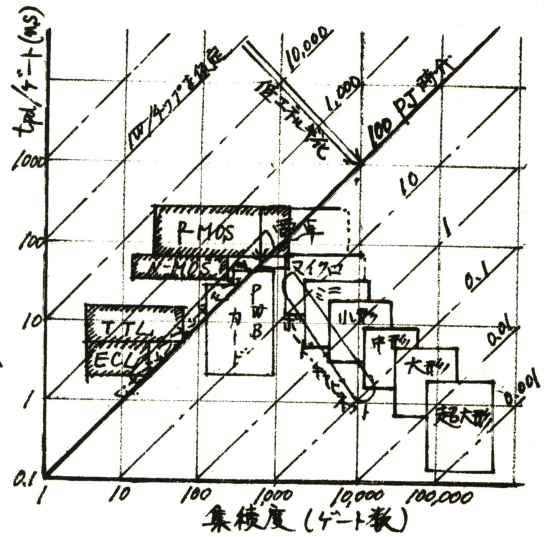
で定まる。1つのチップの $U_B \cdot R_{\text{OB}}$ 積の値は IC \rightarrow LSI \rightarrow VLSI へと技術の進歩にともなって低減し，より高性能化する方向にあるが，現段階では

- ・ 端末，小形用プロセッサはワンチップの $U_B \cdot R_{\text{OB}}$ でゆとりがありソフトをとりこむ方向。
- ・ 大形用プロセッサはチップの $U_B \cdot R_{\text{OB}}$ のトップを使用し，マルチチップでその値を追求。

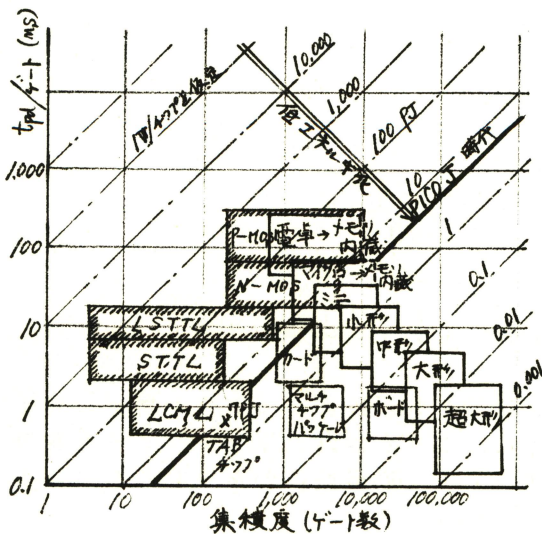
次の4つの図は集積回路技術の進歩の過程において低エネルギー化が推進され，その結果IC, LSI, VLSIがどのようにシステム用プロセッサと結びついてきたかを示したものである。



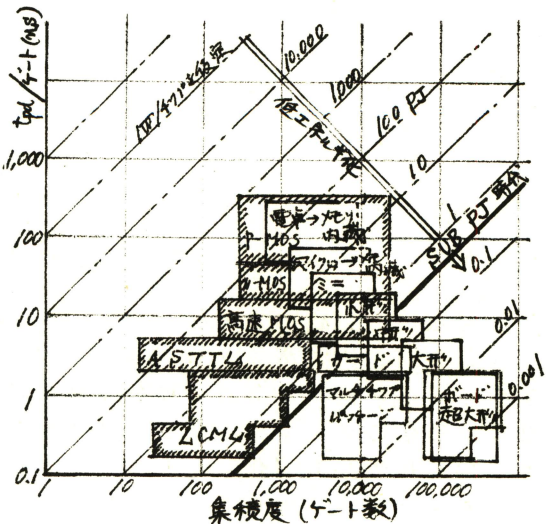
(1) μJoule 時代 初期の SSI



(2) 100 Pico Joule 時代 SSI~MSI~



(3) Pico Joule 時代 LSI



(4) Sub Pico Joule 時代 VLSI

図 1. 集積回路技術の進歩と、プロセッサシステムとの結びつき

半導体 IC 内のゲートの低エネルギー化にともない、LSI チップ内に入れる機能が増大し、小形用から順次ワンチップ化→F/W 化の経過をたどり、大形では多数のマルチチップ構成で、膜集積、プリント板による LSI パッケージ、カードを含めた LSI 化実装を行い、低エネルギー化で順次チップ数が減少する。

5.3 LSIとソフトとの結びつき

これまでシステムを構成するハードとソフトは、システムという場で結合されていた。一方、ハードウェアのなかでは

部品 — 回路 — 機能ブロック — ユニット — 装置 —

(素子, 接続)

という形で取り扱われ装置としてシステムに結びつきソフトはシステムの向う側にあると考えられていた。すなわちチェーン状であった。

LSI化の進歩にともなって部品から回路まで、ブロックまで、ユニットまでさらに装置までLSIデバイスの内にとりこまれる段階になったが、その結果、LSIがソフトウェアと直接のかかわりあいをもち、図2に示すように

チェーンから リングへ

と発展する方向にある。これは、これまでLSIの進歩がハードウェアの性能/価格の向上をとおしてシステムのUPに貢献してきたが、さらに進んで、ソフトウェアを含めてLSIがシステムに寄与する段階に入ったと考えられる。

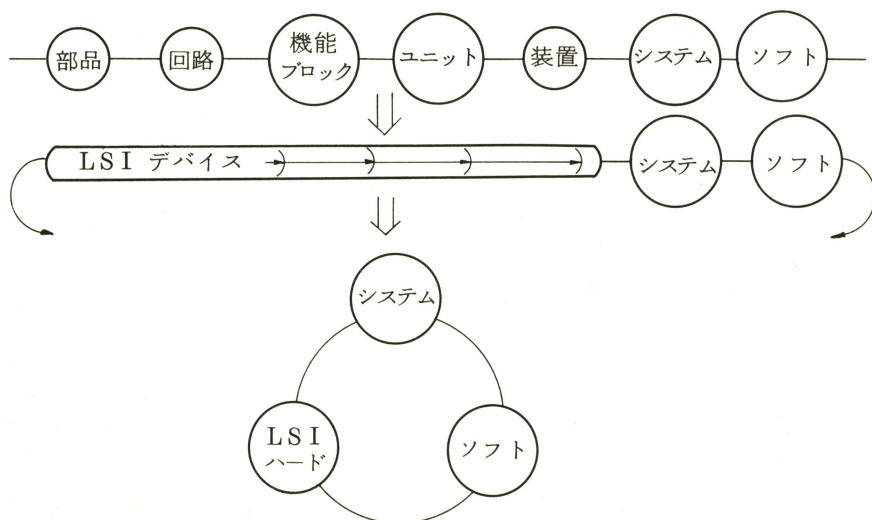


図2. LSI化の進展と、ソフトとの結合 (チェーンからリングへ)

5.4 LSIとC&Cネットワーク

デジタル回路における性能、経済性の課題をLSIによって次々に解決しゆく結果、通信のデジタル化が加速されてきた。これが優れたネットワークを構成する場を提供しLSI化コンピュータと結びついて、広範囲にわたるC&Cネットワークシステムの実現の方向が進められている。

このなかでより優れたユーザシステムを求めるとき、ハードウェア、ソフトウェア、通信の性能と経済性からみた最適化を指向するであろうが、そのなかでLSIの及ぼす影響はきわめて大きく、システム構成を左右することになる。システム内における処理の機能分散、地域分散、DB/DCが優れたプロセッサ、メモリ、光伝送などのシステムLSIによって大きく進展しつつある。

前述のようにシステムの目標は人間一人々々にたいして奉仕することである。現代社会の人々は世界的ひろがりの中で生活している。したがって距離と時間の拡がりを起えて人々の利用できるシステムのためにはたすLSIの役割は大きい。

5.5 LSIとマン・マシンインタフェース

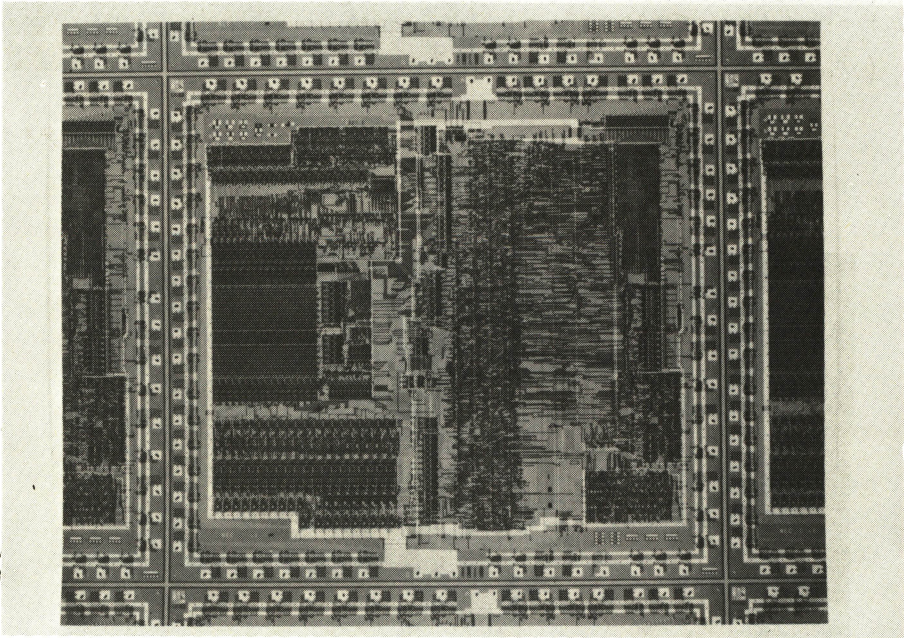
システムがより人間に奉仕するためには人間とシステムとのインタフェースを人間本位の方向に進展することが望まれる。LSI化はこの点でさらにシステムのなかに深く浸透してゆくであろう。これらの主な例をあげれば次のとおり

- ・ 対話形処理
- ・ 日本語処理
- ・ 文字，パターン，音声の認識と応答
- ・ 自動運転，自動保守

さらにシステムの働きのなかで本来人間の介在を必要としないが，技術上介在している場合がある。これらにたいしてはシステム直結が望まれ，いわゆるセンサーなどの役割が重要である。

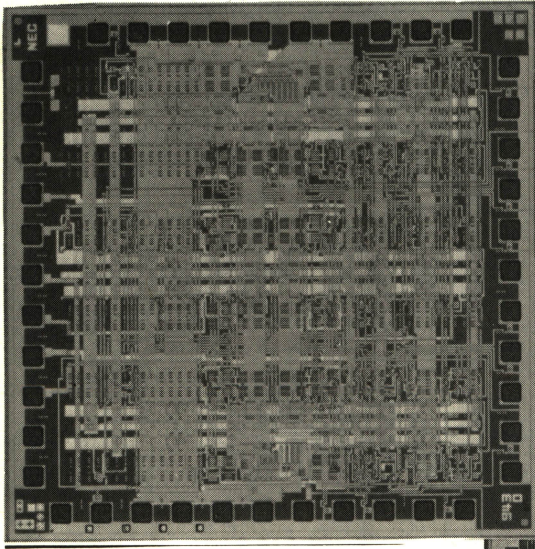
6. 情報処理におけるシステムLSIの例

6.1 小形システム用

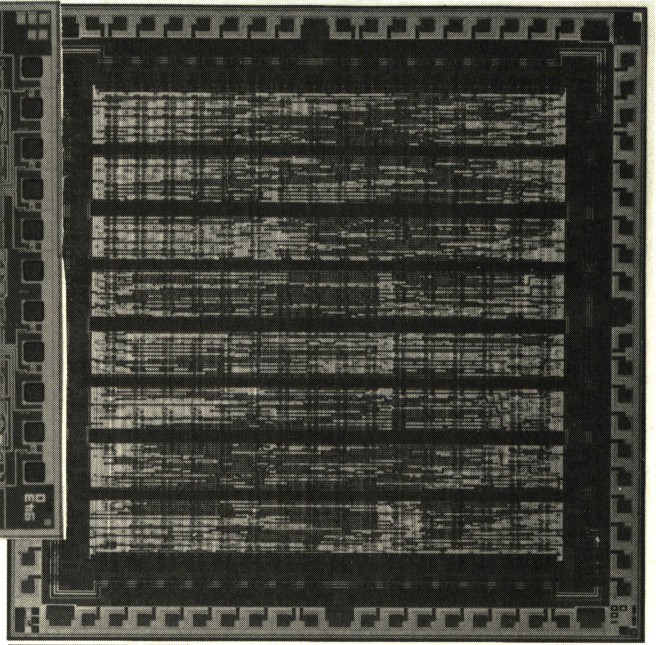


16ビットマイクロプロセッサ
MCOM 1600

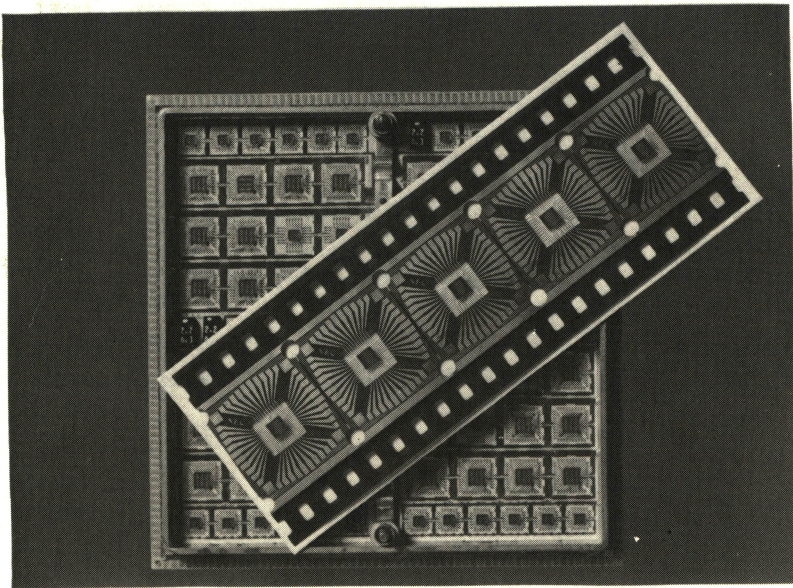
6.2 大形システム用 (b)(6)



200ゲート LCMC マスタスライス
(10mW - 0.7ns) LSI



1200ゲート LCMC マスタスライス LSI
(1mW - 1ns)



TAB (Tape Automated Bonding) 方式 LSI
およそ マルチチップパッケージ (MAX 110477°
MAX 3500ゲート)

むすび

より優れたシステムのために今後さらに高度のLSI化の流れが続いてゆくであろう。超LSI化(VLSI化)はすでに研究から実用化の段階に入り、また新しい素子、接続を指向したJosephson Deviceなどの研究も進められている。

これらの流れは

素子・接続のより微細化，一体化と高集積化によりシステム機能の低エネルギー化，低熱抵抗化，低故障率化をより低コストで実現することによってシステムとしての性能向上を実現するもの。

である。特にコスト低減の目ざましさは衆知のとおりである。

このなかでLSIはソフトウェアとの関連を強め、さらに通信のデジタル化と相呼応して、より人間本位のために点から線へ、線から面へと拡がるシステムへと発展しつつある。各種のハイアラーキをもつLSIはこのシステムのなかに広く分布し、マン・マシンのインタフェース、各種分散処理、ネットワーク、ホスト等のシステムコンポーネントとしてその役割を増々大きくはたすことになるであろう。

現在のLSIの形は将来のLSI, VLSI~の姿につながっている。LSIは電子工業の基幹産業を担うものとして今後さらに巨大な投資が行われるであろうが、その目標はすべて最終的には“より優れたシステム”を生みだすためであると考えられる。

引用文献

- (1) 金井 “電力理論による半導体スイッチ回路の設計法” 信学誌, ㉔50巻(昭42-08)
- (2) 金井 “電力理論による有限長スイッチ回路の設計法” 信学誌, ㉔50巻(昭42-08)
- (3) 金井 “電力理論による一般スイッチ回路の特性と設計法の検討, 信学誌
㉔51-C巻, ㉔11号(昭43-11)
- (4) 渡辺, 金井, 黒沢 “半導体集積回路の設計” 通研実報, ㉔17巻, ㉔6号
P 973, 1968
- (5) 石井, 金井, 田中, 吉田, “大型コンピュータの高集積実装技術とその役割”
日経エレクトロニクス No. 158, P100 (昭52年4月18日)
- (6) 金井 “大型システムからみたLSI”, 超LSI技術-2回路設計, P291,
半導体研究 15巻, 半導体研究振興会



本 PDF ファイルは 1980 年発行の「第 21 回プログラミング・シンポジウム報告集」をスキャンし、項目ごとに整理して、情報処理学会電子図書館「情報学広場」に掲載するものです。

この出版物は情報処理学会への著作権譲渡がなされていませんが、情報処理学会公式 Web サイトの https://www.ipsj.or.jp/topics/Past_reports.html に下記「過去のプログラミング・シンポジウム報告集の利用許諾について」を掲載して、権利者の検索をおこないました。そのうえで同意をいただいたもの、お申し出のなかったものを掲載しています。

過去のプログラミング・シンポジウム報告集の利用許諾について

情報処理学会発行の出版物著作権は平成 12 年から情報処理学会著作権規程に従い、学会に帰属することになっています。

プログラミング・シンポジウムの報告集は、情報処理学会と設立の事情が異なるため、この改訂がシンポジウム内部で徹底しておらず、情報処理学会の他の出版物が情報学広場 (=情報処理学会電子図書館) で公開されているにも拘らず、古い報告集には公開されていないものが少からずありました。

プログラミング・シンポジウムは昭和 59 年に情報処理学会の一部門になりましたが、それ以前の報告集も含め、この度学会の他の出版物と同様の扱いにしたいと考えます。過去のすべての報告集の論文について、著作権者 (論文を執筆された故人の相続人) を探し出して利用許諾に関する同意を頂くことは困難ですので、一定期間の権利者検索の努力をしたうえで、著作権者が見つからない場合も論文を情報学広場に掲載させていただきたいと思います。その後、著作権者が発見され、情報学広場への掲載の継続に同意が得られなかった場合には、当該論文については、掲載を停止致します。

この措置にご意見のある方は、プログラミング・シンポジウムの辻尚史運営委員長 (tsuji@math.s.chiba-u.ac.jp) までお申し出ください。

加えて、著作権者について情報をお持ちの方は事務局まで情報をお寄せくださいますようお願い申し上げます。

期間：2020 年 12 月 18 日～2021 年 3 月 19 日

掲載日：2020 年 12 月 18 日

プログラミング・シンポジウム委員会

情報処理学会著作権規程

<https://www.ipsj.or.jp/copyright/ronbun/copyright.html>