

通信と VLSI インパクト

青山友紀 岩田 穆

青山友紀：正員 NTT 電気通信研究所
 岩田 穆：正員 NTT 電気通信研究所
 Cross-impact between Communications and VLSI By Tomonori AO-YAMA, Member (NTT Electrical Communications Laboratories, Yokosuka-shi) and Atsushi IWATA, Member (NTT Electrical Communications Laboratories, Atsugi-shi).

1. ま え が き

Bell が電話を発明し、Hertz が電波の送受信実験を行ってから約 100 年、今世界は 5 億台の電話機を用い、4.5 億台のテレビを見ている。その間の電気通信技術の進歩はまさに驚異の一語につきよう。その進歩は必ずしも直線的でなく、幾つかの時代を画する技術革新——電子管の発明、トランジスタの発明、集積回路の発明——によって大きな飛躍がもたらされてきた。それらは電気通信のみならず、その枠を越えて人類社会全体に大きなインパクトを与えたことは周知の事実である。現在は超 LSI 革命ともよぶべき技術革新が日常進行しているところである。それが電気通信にいかなるインパクトを与えるのだろうか。ここでは電気通信システムと VLSI のかわりについて、主として公衆電気通信を例にとり概観してみよう。

2. 20 年の進歩

今からちょうど 20 年前の 1966 年 4 月に本学会誌

表 1 集積回路 20 年間の進歩

パラメータ	比 率
集 積 度	10^4
チップサイズ	25 ~ 40
最小線幅	1/16 ~ 1/20
動作速度	100
メモリコスト	10^{-4}
ゲートコスト	10^{-8}

で「超小型回路特集」が組まれたのを御記憶の方もおられよう。そこでは誕生から 5~6 年を経て、発展を開始したばかりの集積回路のインパクトが語られている。それから 20 年、IC は LSI へ、LSI は超 LSI へと驚異的なペースでひたすら進歩してきた。表 1 に 20 年間の進歩の跡を示す。それは電子管から半導体といった質的変化ではなかったが、これ程の量の変化はそれを用いるシステムに質的变化を引き起さずにはおかない。1966 年には、電話加入数はまだ 850 万程で現在の 20% にすぎず、住宅電話普及率は 10% でしかなかったが、我が国のデジタル通信の歴史が始まった直後であった。今日、我々は CD、デジタルテレビ、デジタル時計、電卓、パソコンといったデジタル機器に囲まれて生活するようになっている。これらのデジタル機器には二つのルーツがある。PCM 通信とデジタルコンピュータである。

1937 年にフランスの A.H. Reeves によって発明された PCM 通信は複雑な高速パルス回路を多用するため、電子管の時代にはついに実用に至らなかった。もう一方のルーツであるコンピュータも ENIAC の例を考えるとほぼ事情は同じと考えられる。「デジタル」はトランジスタの出現によって初めて工業的に使いものになったといってもよいだろう。発明から 4 半世紀後の 1962 年に米国でトランジスタを用いた 24 チャンネル PCM 伝送方式 (T1 方式) が実用化され、我が国でも 1965 年に PCM-24 方式が実用化されてデジタル時代に突入した。そのときの PCM 端局装置に用いられたトランジスタ数は約 340 個、ダイオード約

1,500 個であった。

さて、PCM によるデジタル伝送方式の実用化が追い込みに入った 1950 年代の後半には、時分割スイッチによるデジタル交換 (PCM 交換ともよばれていた) の研究も既に開始されており、伝送路と交換機を全デジタルで実現するデジタル統合網 (IDN: Integrated Digital Network) が究極の目標として掲げられていた。しかし、これらのデジタルシステムが経済的に成り立つためにはトランジスタでは十分でなく LSI の登場を待つ必要があった。我が国でデジタル統合網が実用稼働したのは PCM 伝送開始以来 18 年後の 1983 年のことである。

LSI 技術はデジタル統合網を可能にしたが、そのキーコンポーネントを二つ挙げよう。単一チャンネル PCM-CODEC-LSI と時間スイッチ LSI である。音声 CODEC はアナログ音声をデジタルパルス列に変換および逆変換する変換器であり高速・高精度・高安定な部品と回路技術が必要とする。そのため高価であり、多数のチャンネルで回路を時分割多重使用する Shared CODEC によって初めてアナログ伝送方式に対する経済的優位を確保できたが、それでは多重化のメリットを享受できない加入者系あるいは端末への適用は不可能である。PCM-CODEC を 1 チャンネル単位で 1 チップに集積化することによって量産による大幅なコストダウン、小形化・低電力化という LSI の長所をフルに発揮して、加入者系や端末の領域に PCM を持ち込む展望が開けたのである。いつの日にかすべての電話機に音声 CODEC が搭載されるときが来るだろう。図 1 はトランジスタ、IC、LSI とキーデバイ

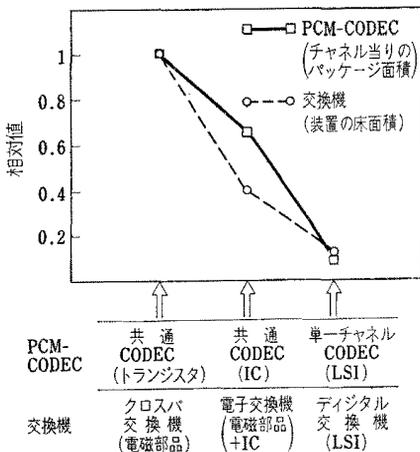


図 1 PCM-CODEC と交換機の小形化の進展

スの進歩に伴う PCM-CODEC の小形化の過程を示したものである。

交換機への半導体部品の本格的適用は蓄積プログラム制御の電子交換機に始まったが、デジタル統合網を実現する通話路のデジタル化は長年の悲願であった。クロスバやリードリレーなどの小形電磁スイッチに打ち勝つには時分割多重化されたタイムスロットを時間軸上で入れ換える安価な大容量時間スイッチの実現が不可欠である。時間スイッチ LSI の詳細は次章で述べられるが、一種のメモリであり、LSI で最も技術進歩の早いメモリ技術を応用して実現された。デジタル交換機にはこれ以外にも多くの LSI が用いられている。図 1 に電磁部品のクロスバ交換機、制御系に IC を適用した電子交換機、および LSI を用いたデジタル交換機の小形化の変遷を示す。

ところで上述の例からもわかるようにキーデバイス技術とそれを用いるシステムの進歩にはタイムラグがある。集積回路が出現しはじめたころ、トランジスタを用いた PCM 伝送方式が実用化され、超 LSI 時代に入ったころ、LSI 技術をベースとするデジタル統合網が実現した。コンピュータは新デバイスの登場によってすっかりモデルチェンジするのに対して、通信システムは耐用年数の長い膨大な既存設備を維持しながら次第に新しいものを取り入れていくのでインシャーが極めて大きい。超 LSI を使いこなす通信システムの登場にはあと何年かかるだろう。それが高度情報通信システムであることは間違いない。

3. 通信の特徴と VLSI

LSI の 3 大ユーザは民生機器、コンピュータ、通信であるが、通信という領域は LSI にとって必ずしも水にあっているとはいえない。ある意味で LSI 研究開発担当者泣かせの部類に入るのはないだろうか。ここでは VLSI からみた通信の特徴、あるいは VLSI への要求条件について述べる。図 2 に全体を示してある。

(1) 少量多品種

通信用に開発する LSI に要求される機能は扱う信号の種類、速度、使用条件によって千差万別であり、しかも個々の LSI の需要量はメモリや民生機器用 LSI に比べてけた違いに少ない。この懐石料理のごとき品数の多さと一品の量の少なさは本来 LSI にはなじまないところであるが、それでもシステムの要求から LSI 化を行わねばならない。少量多品種の LSI を

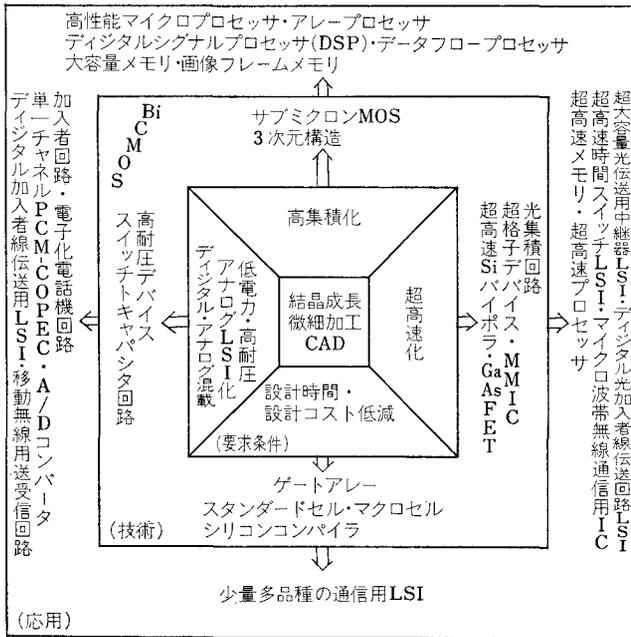


図 2 通信用 VLSI の要求条件と適用例

いかに効率的に開発するか、これが通信用 LSI の重要な課題である。この課題を解決するためにゲートアレーとよばれる LSI 設計手法が考案された。これはあらかじめ単位とするトランジスタやゲートを規則的に配置してウェーハ上に形成しておき、ユーザの所望の論理を配線のみで実現するため、設計が容易で、設計完成からチップ完成までの期間は 4~8 週間くらいである。ゲートアレーの価格の低下は著しく、ゲート当たり 0.5 円程度に達しており、その市場は通信のみでなくコンピュータ、民生機器と広く、1985 年度で 1,000 億円にもなると見られている。またスタンダードセル、マクロセルなどの設計手法やシリコンコンパイラなど、将来の安価で高性能なカスタム LSI 設計手法の開発が進んでいる。

一方、システム設計者は VLSI の規模の増加に伴いどのような機能をチップ上に切出すか、これがより重要になってきた。少量とはいっても機能を取捨選択し、できるだけ汎用性を持たせる必要がある。通信用として誕生し予想外のベストセラーとなったものにデジタルシグナルプロセッサ (DSP) がある。DSP については後続の解説で詳述されるが、そのプログラマビリティは少量多品種に対する一つの有効な解決法である。このように通信に要求される多様な機能の中

から新しい汎用性のある LSI を発想することが我々の課題であろう。

(2) 超高速 LSI

通信は電子管の時代から常に部品の高周波化、広帯域化、高速化についてのけん引車であった。無線通信は絶えず新しい周波数の開拓を目指し、有線通信は超多重化へ挑戦しつづけ、その都度無理難題をデバイス技術に押しつけてきた。光ファイバが実用化されデジタル伝送速度は 100 Mbit/s のオーダから一挙に Gbit/s、更に 10 Gbit/s へと飛躍し、超高速光伝送システムのボトルネックは今や集積回路の高速性にある。また衛星通信では数 GHz~数十 GHz のマイクロ波帯無線通信用回路の集積化による小形化・高信頼度化が必要となっている。更に映像サービスに代表される高速・広帯域メディアの出現に伴って交換機および端末でも音声に比べて 1~3 けた上の広帯域・高速情報を処理する必要に迫られている。このように依然としてデバイスの高速

化への要求はとどまるところを知らない。これらの要求を受けてデバイス側では Si パイポーラと GaAs FET が速度競争を続けており、更に高速化のポテンシャルを持つ HEMT・HBT などの新デバイスの開

表 2 超高速デバイスの性能

ゲート遅延 デバイス	現 状		将来の 期待値
	リ ン グ オ シ レ ー タ	ゲ ー ト ア レ ー	
Si パイポーラ	30 ps	80 ps	10 ps 以下
GaAs FET	10 ps	40 ps	5 ps 以下
超格子デバイス (HEMT, HBT)	10 ps	—	1 ps 以下

発に拍車がかかっている。これらの性能を表 2 に示す。また、MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit) は GaAs FET デバイスに電子ビーム露光などの VLSI 加工技術を用いて高周波化、大電力化の道を進みつつある。

(3) アナログ回路の LSI 化

我々が日常通信に使っている音声はもともとアナログ信号である。人間はアナログなじみが深いので、通信のデジタル化が進んでもマンマシンインタフェースとしてアナログを扱う回路は不可欠である。また、伝送路の持つアナログ的性質 (例えば信号の減衰や波形のなまり) から送受信器や中継器では等化、増幅な

どのアナログ機能が必要である。

通信システムから要求されるアナログ信号の種類、電圧レンジ、周波数レンジの多様さは前述の少量多品種の源にもなっている。更にアナログ回路は精度、安定性、雑音といったデジタルにはない課題を含んでいる。これらはいずれも VLSI 技術の苦手とするところであり、大量生産される大容量のメモリとはかなり異質のものであった。

しかし、通信システムの高機能化、小形化、経済化の要求に対して、VLSI 技術はこの問題を解決してきた。前述の PCM-CODEC-LSI はその例である。もう一つの例を紹介しよう。電話機を動作させるための回路（加入者回路とよばれる）は個々に交換機に用意されており、48 V 電源の供給、ベルを鳴らすための 100 V 以上の交流信号の供給、2 線式伝送と 4 線式伝送の変換などの機能を必要としている。これらはリレー、トランスなどの電磁部品と IC で実現されていたが、この機能を LSI 化し、デジタル交換機を小形で安くするのは極めて困難な課題であった。種々の条件を考慮すると 400 V の電圧が加わっても破壊されず、かつ 60 dB 程度の広いダイナミックレンジの音声を正しく伝える性能が要求された。このため、素子間を絶縁体で分離する高電圧 LSI 技術や高精度な回路技術を開発し、ついに加入者回路の全 LSI 化が達成された。この LSI もデジタル交換機を実現したキーデバイスである。今後とも通信にとってアナログは除去できない機能であり、VLSI 技術と適合するようアナログ機能を等価なデジタル回路に置き換えるデジタル信号処理技術や、マイクロプロセッサのような論理 VLSI に A-D、D-A 変換などのアナログ回路を搭載する技術を実現していかなければならない。

(4) 光集積回路

VLSI と光通信の 2 大技術のインパクトの大きさから現在はいけい素（シリコン）の時代とよばれる。その一方の光通信は光ファイバ、発光素子、受光素子の 3 基本技術が昭和 50 年代に入って急速に確立され、日本では 1981 年に 32 Mbit/s および 100 Mbit/s の伝送速度を有する光ファイバ伝送方式が商用導入された。更に、1985 年には高度情報通信システム (INS) の動脈として、400 Mbit/s の大容量光ファイバ伝送方式が日本を縦貫して布設され、サービスを開始したことは記憶に新しい。

しかし、電気信号と光信号との相互変換を行う光素子はトランジスタレベルの個別部品であり、機能を集

積化するところまでいっていない。伝送や計測の領域で成功した光技術を更に高度化すると共に、通信の他の領域およびコンピュータの領域に広げていくには光素子技術と LSI 技術の融合、すなわちホトンとエレクトロンを同一 LSI 上で扱う技術の確立が重要課題である。現在、GaAs および InP などの 3 元化合物半導体を用いて pin 受光素子、FET 増幅素子、レーザダイオードを集積化する試みが進められている。化合物半導体技術の進歩により実用化される日も遠くないであろう。更に光の領域で増幅、変調、スイッチ、論理、記憶などの、通信に必要な機能を実現する研究も行われており、トランジスタに匹敵するような新しい材料や素子の探索が続けられている。このような光素子と電子回路の集積化、および光素子の複合化は、光伝送方式の一層の超高速化、中継距離の拡大に必要であるばかりでなく、光信号処理、光交換機さらに光コンピュータを実現するために必要不可欠な課題である。

4. 高度情報社会と VLSI

高度情報社会という用語が頻繁に用いられている昨今であるが、しからば単なる情報社会に対して「高度」がつくと何が違うのだろうか。これに対する明解な定説はないようである。「だれでも、どこでも、いつでも、だれとでも」通話できるのが電話の理想とすれば、「欲する情報を、欲する形態（メディア）と品質で、欲する人に、中味に応じた価格で」送り届けるのが高度情報通信システムかもしれない。このようなシステムを構築するには今後多くの課題に取り組まなければならない。情報を効率よく安価に送達するインフラストラクチャー特に加入者分配系一の整備、だれでも使える使い勝手のよい端末の開発、情報のデパートであるデータベースの構築、等々。以下、筆者の独断と偏見で高度情報通信システムと VLSI とのクロスインパクトについて技術革新の特に必要な四つの領域を取り上げて若干展望してみよう。

(1) 加入者系の変革

電話の 4,300 万加入者には一部の例外を除いて電話局から一対ずつ通信線が延びている。これは水道、電気、ガスのトリー状トポロジーの分配系と異なる電話の特徴であるが、長らく加入者系がエレクトロニクスの技術革新の恩恵に浴することができなかったのは、この個別配線のため多重化の技術が使えなかったことが大きい。しかし高度情報社会を担うニューメディア

サービスの提供のためには各種サービスに対して加入者系を汎用化できるデジタル化が必須である。この手つかずのフロンティアに対して二つのアプローチで挑戦が試みられている。

第1のアプローチは既に布設された膨大な電話線をそのまま生かしてデジタルサービスを提供しようとするいわば在来線方式であり、CCITT で標準化が進められている 64 kbit/s 系 ISDN 方式に代表される。音声伝送用に張られた一対の電話線を用いて数百 kbit/s のパルスを数 km にわたって無中継で双方向伝送するためには複雑な波形処理が必要であり、経済性、小形低消費電力の条件が格段に厳しい加入者系でそれを実現するためには VLSI 技術に依存するほかはない。加入者系に適用するデジタル送受信用 LSI は通信特有のアナログ・デジタル混載の VLSI となるが、現在競って開発が進められている。このアプローチが成功すれば今ある電話線をそのまま使って 64 kbit/s 2チャンネルと 16 kbit/s 1チャンネルのデジタルサービスを提供できるようになり、家庭で受けられるサービスのメニューは相当拡大する。

一方、第2のアプローチは加入者系を抜本的に変革し、その基本部分は半世紀から1世紀レンジでの技術革新に耐え得る次世代加入者系を構築しようとする新幹線方式である。本アプローチは、高度情報社会は電話に比べて1けたないし3けた上の伝送容量を必要とする映像メディアが主体となるとの確信に基づいている。

ごく最近になってこの次世代方式の本命はシングルモードファイバによるデジタル光方式であろうとの見方が固まりつつある。しかし、仮に多くの家庭にファイバが布設され、電話局に何千対のファイバが集まってくることを想定してみよう。現在の光中継伝送方式(例えば F-400 M 方式)の技術で構成することを想像すると、経済性、装置規模、消費電力、信頼性いずれをとってもその技術レベルは個別トランジスタで PCM-CODEC を構成し、加入者系に適用しようとするのに対比できよう。次世代加入者系の実現には VLSI 技術と並んで前述の光集積回路の進展が鍵(かぎ)をにぎっており、光周波数多重化、光時分割多重化、光スイッチ等を可能とする新しい光機能素子の開発が必要である。

デジタル光加入者系は VLSI 技術の進展をベースとする分散処理技術と相まって百年近く続いた加入者系のスター形トポロジーに変革をもたらすと共に通

信と放送の融合等、その与えるインパクトは極めて大きいと予想される。

(2) ネットワークの高度化

交換機に対する蓄積プログラム制御の導入以来、マイクロプロセッサの進展に伴ってネットワークの各部分にインテリジェンスの導入が進んでいる。しかし、従来は交換機、伝送端局、監視システム、端末等各サブシステムごとの縦割りインテリジェント化であり、今後の課題はネットワーク全体を管理し、機能を分担した各プロセッサを有機的に結合するネットワークオペレーションシステムの構築にある。これによってニューメディアサービスに対するネットワークのより効率的運用が可能となる。ネットワークの保守には経験と知識が必要であり、人間に代ってこれを行うには AI (Artificial Intelligence) の助けが必要である。従ってプロセッサに要求される処理能力はますます高くなり、VLSI 技術をベースとした次世代通信プロセッサの開発が必須である。

一方、情報信号の通過する情報系統(伝送路、多重化装置、交換機通路など)の課題は依然として大容量化と経済化であり、GaAs LSI や MMIC は次世代の大容量光伝送方式や大容量衛星通信を支えるキーテクノロジーである。この領域はスーパーコンピュータと並んで今後ともデバイスの高速化に対する機関車の役目を果たし続けることであろう。

(3) 画像メディアと VLSI

テレビの誕生以来、劇画、イラスト、アニメなど視覚に訴える画像文化がぼつ興し、昨年の科学技術博覧会は3次元映像を目玉とする映像博覧会の様相を呈した。高度情報社会では画像メディアが重要な役割を演ずるのは間違いないところであり、それをいかに有効に扱えるかが高度情報通信システムの一つの鍵である。テレビ画像は放送、ビデオ、CATV によって広く普及しているが、これを通信網にとり込むには音声の 1,000 倍という広帯域性が障害となってきた。15 年程前に期待を込めて進められたテレビ電話システムの開発が成功しなかったのは当時の技術ではその壁を克服できなかったからである。この3けたの情報量の差に対して料金の差はホームユースを考えると5倍以下、望ましくは数倍程度に抑えることが必要である。そのギャップは VLSI と光通信の両技術の進歩でカバーするほかないだろう。最近、大容量メモリ技術の応用として動画像を記憶する画像フレームメモリが開発され、また画像処理プロセッサの VLSI 化が進ん

できたことによって、動画像の帯域圧縮符号化技術が急速に進歩しており、テレビ会議サービスに対しては64 kbit/s ないし 384 kbit/s の符号化速度で十分な品質が得られつつある。

一方、CATV におけるテレビ番組や次世代テレビと目される高品位テレビをサービスするには、現状では数十～数百 Mbit/s の速度を必要とする。従って、なお一層の帯域圧縮技術の向上、伝送路および交換機通路の大容量化、高速化が必要である。

(4) マンマシンインタフェースの高度化

現在、我々は通信端末の使い勝手についてもう一つ満足できないことが多い。人間の方が機械に合させられているからである。高度情報社会では機械の方が人間に合すことが必要である。通信端末の究極の形態はロボットと一体化するのではないだろうか。人間の命令によって必要な情報をデータバンクから取り寄せ、必要な相手呼び出し、とどいたメッセージを読んで

くれ、望みのテレビ番組を見せてくれて、……。従って端末の高度化とは、どんどん端末にインテリジェンシを持たせ、人間の言語や文章を認識理解させる方向に進むだろう。音声・文字・パターン認識の研究は急速に進歩しており、AI の研究も最近フィーバーといってもよい状態である。ようやく機械が人間に合せてくれる下地ができつつある。このような高度な機能の実現には極めて大容量のメモリと 1GIPS を超える超高性能のプロセッサが必要である。LSI 集積度の年2倍という急速な向上に伴ってチップに乗せるものなくなるのではないかという心配は全く必要ないと思われる。

端末についてはもう一つの夢がある。それはどこにでも持って行けて、どこからでもかけられる携帯電話機であり前述の電話の理想を実現するものである。自動車電話および自動車の外に持ち出せる携帯電話の研究は着々と進歩しているが、大部分の人がポケットペ

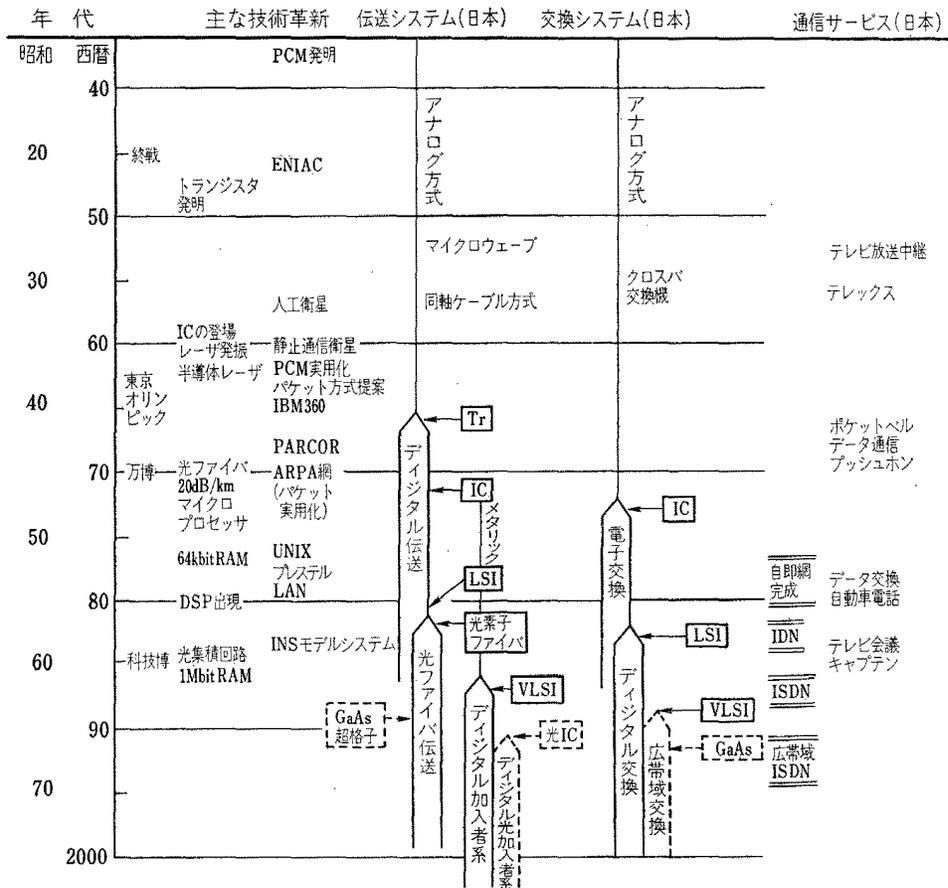


図3 デバイス技術と通信システムの進歩

ル程度の大きさの電話機を持ち歩けるようになるには、電波の問題を別にしても、音声周波から無線周波までの広い帯域の信号処理機能を搭載し乾電池で動作する VLSI の開発等今後なすべき課題は多い。

5. おわりに

通信と VLSI のクロスインパクトに関して、過去の経緯 (図3参照)、VLSI から見た通信の特質、高度情報通信システムと VLSI のかかわり等を定性的かつお話し風に述べた。技術に裏付けされた定量的な議論は後続の各解説に期待されたい。通信以外の領域の方々但至少でも御理解頂ければ望外の喜びとするところである。



青山 友紀 (正員)

昭42東大・工・電子卒。昭44同大学院修士課程了。同年電電公社通研入社。以来、デジタル信号処理、音声符号化、伝送端局等の研究に従事。現在、NTT電気通信研究所伝送処理研究室長。昭48から1年間MITで研究に従事。著書「デジタル信号処理の応用」など。



岩田 穆 (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電気通信研究所入所。以来、通信用のRCアクティブフィルタ、A-D・D-A変換LSI、デジタル信号プロセッサLSI等の開発に従事。現在、NTT厚木電気通信研究所集積回路研究部電子回路研究室長。

国際会議

Ninth International Joint Conference on Artificial Intelligence (第9回人工知能国際会議)

主催：人工知能国際会議組織委員会
日時：1985年8月18～23日 (このうち、18～19日はチュートリアルでテクニカルセッションは、20～23日)
会場：カルフォルニア大学ロサンゼルス分校
参加者：約5,500名
主要参加国：アメリカ、イギリス、カナダ、フランス、ドイツ、日本等
セッション数：15 テーマ 245 件
展示：約50社
Proceedings 発行所：Morgan Kaufmann Publishers, Inc
(95 First Street, Los Altos, Calif. 94022, USA)
主たるトピックス
人工知能はエキスパートシステムの設計のための技術を

提供するものとして現在、最も注目されている。そして、トピックスとしても、エキスパートシステムは論文数として28件であり、学習や知識獲得の31件に次いでいる。但し、論文の内容としては、それほど新しいものではなく、むしろ、推論関連(22件)や自然言語(28件)の方が、理論的にも、また、内容的にも充実していた。その他、知識表現(21件)のテーマが活発に、発表された。また、人工知能のための architecture が独立したセッションになっており、論文数としては8件であったが、非ノイマン型コンピュータや、コネクションマシン、更に、人工知能用マシンの開発を旨としたものの発表があった。現在でも、人工知能用のマシンの模索が続けられているようである。日本の発表が多かったセッションは論理プログラミングで、12件の論文のうち6件が日本からのものであった。日本からの特別講演として、東大工学部の井上教授の“人工知能とロボットの橋わたし”と題するものがあり、好評であった。次回は、イタリアのピサで、2年後に開催される予定である。

(執筆) 溝口文雄：正員 東京理科大学理工学部