私の
研究者歴

黎明期における 電子交換方式の研究

東京大学名誉教授

秋山 稔

Minoru Akiyama

早いもので大学を卒業してから、はや半世紀が過ぎてしまった。たまには学会の全国大会などに顔を出すこともあるが、時代は2世代も変わってしまったような気がする。ここ数年の技術の発展は目覚ましく研究の中身にはだんだんついていけなくなってしまうが、若い方々が熱心に研究発表をされているのを見ると大変頼もしく感じている。本誌、通信ソサイエティマガジン編集長から原稿執筆依頼があったとき、技術の将来動向などはとても書けないといったんはお断りしたが、昔話でもよいとのことで敢えてお引き受けした次第である。

私は1955年に大学を卒業し、大学院に進学して通信工学の研究に携わらせて頂いた。当時はまだトランジスタも実用化はされておらず、コンピュータも真空管や放電管を使って研究されていた。そんな時代に指導教官の尾佐竹教授から「いずれ電子の時代がくる、電子の最大の特徴は高速性にある、この特徴を生かした電話交換機を作ってみないか」とのお声がかかり、電子交換の研究を始めたのが私の研究歴の原点である。

1960年に東大工学部に就職した。私の研究室では主に交換システム、通信トラヒック理論、通信網構成の3

分野を対象に研究を行った。そのすべてを紹介するにはとても紙数が足りないの、本文では黎明期における電子交換システム研究の思い出と、そこから得たいくつかの経験などを紹介してみようと思う。学生さんや若い研究者の方々の御参考になれば幸いである。

我が国最初の時分割多重形 全電子交換機の試作

私が大学を卒業したのは1955年で、まだ戦後の混乱は続いていたが、若者は皆日本復興を目指してそれなりに頑張っていた。そんな時代にヨーロッパでは電子交換の研究が始められたとの情報を得た。早速文献調査を行ったが、当時は文献を手に入れるのも大変な時代であった。手に入ってもコピー機はなく、論文を写真に撮り現像しなければならず手間と時間がかかった。そこで図書館に入り浸って翻訳しながらノートに書き写した。今考えると結局それがいい勉強になったように思う。今は何でも簡単にコピーでき、インターネットからも情報がたくさん入る。たちまちにしてファイルが一杯になる。ろくに読まずして2、3年後には廃棄する。あまり便利

になるのも善しあしである。新しく研究を始めるには、少数でもいいから原論文を精読してじっくり考えてみる必要がある。

大学院に進学して電子交換機を作ってみようと考えた。クロスバー交換機のリレーを電子に置き換えた空間分割形の電子交換機の研究は各所で開始されていたが、電子の最大の特徴は高速性にある。高速性を生かすには時分割多重形がよいと考えた。当時はまだトランジスタは実用化されておらず、制御部に真空管を、記憶装置に冷陰極放電管を使うことにした。Ge ダイオードはやっと市販され始めていたが、大学出の初任給が1万円そこそこの時代に1個1,000円もした。これらの部品を調達するのが最大の関門であった。

PCMはまだ基礎研究の段階で、1個の符号・復号器だけで実験機が一杯になってしまうので、PAMのアナログ方式を採用した。大学院学生時代に3年がかりで、1958年3月に30回線容量の我が国最初の時分割多重形の全電子交換機の試作に成功し、AO-1形交換機と命名した（Aは秋山、Oは指導教官の尾佐竹先生の頭文字）。使用部品数は真空管70個、冷陰極放電管80個、Geダイオード230個、抵抗1,100個、コンデンサ450個であった。図1に試作機の写真を示す（[1]、[2]参照）。

内外から多数の見学者が訪れ、東大総長の御案内でフランスの学士院長がお見えになり、フランス語もよく通じると励まして頂いたことを今でも覚えている。

図1 我が国最初の時分割多重形全電子交換機 AO-1 の試作（1958年）

スイッチ回路や制御部の試作は比較的すんなりいったが、苦労したのはベル信号と電源であった。当時の黒電話機のベルを鳴らすには48Vを断続するような大電力信号が必要であり、とても電子スイッチを通せなかった。やむなく効率は犠牲にして各加入者端子から供給せざるを得なかった。真空管を使用していたので大容量電源を作るのにも苦労した。また、放電管は光が入ると誤動作するので管壁を黒く塗らなければならなかった。

試作を通じて感じたことは、物事は必ずしも理屈どおりにはいかないということである。ネックがどこにあるかは作ってみないと分からないということであった。最近ではコンピュータが手軽に使えるようになったので、システム研究でもすぐシミュレーションから始める研究が多数見られる。シミュレーションはシステムがある程度固まってからの最後の仕上げには有効であろう。しかし新しい研究にはいろいろと見落としや落とし穴があることが多い。コンピュータは前提条件を適当に与えれば頭を使わなくてもせっせとデータを出してくれる。しかしその前提条件に見落としがあれば紙屑と化すことにも注意が必要である。

並列PCMスイッチング方式の提案

PAM交換機は回路が簡単であるのが特徴であるが、通話特性上に問題があった。PAMはアナログ方式であるので雑音、漏話、ひずみの限界から多重度を100チャンネル程度以上にするのはかなり困難であった。それよりも問題はレベル変動であった。伝送の場合は送受信間で微調整もできるが、交換の場合には絶えず相手が変わる。システム全体を高度に安定化しておく必要がある。このような問題から、PAM交換機は一部実用化が行われたが、端子容量500回線規模の少容量交換機に限られていた。

その後、まだ個別部品ではあったがトランジスタの実用化が始まり、伝送分野ではPCM通信の研究が盛んになってきた。PCMはデジタルであるので上記の問題は解決できるであろう。伝送系がPCMになったときに、もし交換系もPCMで多重化されれば伝送と交換のインタフェースが簡略化されて経済的なデジタル統合網が実現できると考え、PCM交換の研究を開始することにした。

PCM 交換はその後デジタル交換と呼ばれるようになったが、時分割多重形交換機のスイッチ回路網のトラヒック処理効率を高めるには時分割多重度をできる限り高める必要がある。多重度を高めるには、電子素子自体を高速化する方法や書き込み読出しの回路的工夫なども考えられたが、最も簡単で効果的な方法として並列 PCM スwitching 方式を考案した(文献[3] 参照)。

電話 PCM を符号化する場合 1 サンプル点は 8 ビットで構成される。これは図 2 (a) のように時間的に直列に伝送してもよいし、図 (b) のように伝送路を並列線で構成して並列に伝送してもよい。前者を直列 PCM、後者を並列 PCM という。

伝送系では伝送路の節約のため普通直列 PCM が使われているが、交換系の伝送路は局内配線(ハイウェイという)であるので並列 PCM が採用できる。並列では多重度は 8 倍になるが、ハイウェイの線の本数やゲート数も 8 倍になるので一見あまり差はないように見えるが、交換スイッチ回路網に組み上げると大きな差が出てくる。デジタル交換スイッチ回路網は時間スイッチ(メモリスイッチともいう)と空間スイッチ(ゲートスイッチともいう)からなるが、並列にすると時間スイッチ容量が 8 倍になるのでトラヒック理論の大群化効果でトラヒック処理効率が向上すること、同一局規模で比較すると時間スイッチユニットの数が大幅に減少し制御も容易になること、空間スイッチの所要ゲート数が減り、更にゲート制御のための搬送パルス供給回路の数が大幅に減少することなどである。

例えば図 3 は同程度の規模の空間スイッチを直列 PCM と並列 PCM で組んだ場合を比較したものである。並列 PCM の場合にはクロスポイントの 8 組のゲートは 8 本の並列ハイウェイの対角線にのみ配列すればよく、しかもその開閉制御は 8 個のゲートに同一の制御パルスを加えるだけでよい。したがって同程度の規模のス

図 2 直列 PCM と並列 PCM

イッチ回路網では総ゲート数は $1/8$ 、制御端子数は $1/64$ で済むことになる。制御端子に供給する可変位相の搬送パルス発生回路はスイッチ回路で最もコストを要する部分であるのでその効果は大きい(文献[4], [5]参照)。

並列 PCM スwitching 方式はその後世界中のデジタル交換機に採用された。私はこの方式の特許を大学院学生時代に申請した。当時は特許審査に時間を要し、特許が確定したのは 1964 年 6 月であった(特許第 316716 号)。特許を申請したときは「ひょっとしたら大金持ちになれるかもしれない」と思ったが、世の中はそんな甘いものではなかった。特許権は 15 年で切れる。実際にデジタル交換機が実用になったのは特許権が切れてから更に数年以上経ってからのことであった。特許権を維持するには毎年多額の維持料を特許庁に納付しなければならない。個人で維持するのは大変である。結局この特許で儲けたのは特許庁だけであった。ところでデジタル交換機の実用化には研究開始から 20 数年の長い時間を必要としたが、その理由については次節で説明することにする。

PCM 交換(デジタル交換)の研究

私は 1960 年に大学院を修了し、東大工学部に就職し

図 3 同程度の規模の空間スイッチにおける直列 PCM と並列 PCM の比較

た。我々の研究室では PCM 交換方式の研究を続けることにした。このころになると、まだ個別部品ではあったがようやくトランジスタが使えるようになってきた。そのころのトランジスタは雑音発生器との異名をもち、やや不安定な代物であったが 1 個 5,000 円くらいした。その資金調達には苦労したが、並列 PCM 交換機の試作を行うことにした。

交換機は加入者端子からのトラヒックを集める集線スイッチ回路と、多くの集線スイッチ回路の出力をとりまとめて行先別に振り分ける分配スイッチ回路から構成される。個別部品で各加入者端子に PCM 符号・復号器を配置するのは大変であったので、集線スイッチ回路には 32 チャンネルの PAM 多重スイッチを採用した。分配スイッチ回路には 256 チャンネルの並列 PCM スイッチング方式を用いて、通話路系が主体であったが一応試作に成功した。1963 年ごろである。この試作機を用いて通話特性やトラヒック処理特性の検討などを行った(文献[6]参照)。

理論的にはデジタル交換は通話特性やトラヒック処理特性上優れた方式であることが明らかにされたが、最大のネックは経済性の問題であった。当時使われていた主要交換機は機械式スイッチと電磁リレー制御によるクロスバー交換機であり、機能的にも経済的にも極めて優れた交換機であった。何でこれを電子化する必要があるのか、接点と電子回路のどちらが安いのかという議論が盛り上がった。当時、アメリカのベル研究所と日本の電々公社 (NTT の前身) 電気通信研究所は交換分野では東西の両横綱であった。その電々公社がこともあろうにデジタル交換機は経済的に見て将来性の見込みはないとの理由で、公式の研究発表会の席上でデジタル交換機研究開発の中止を宣言した。我々の受けたショックは大きかった。以後、研究は大学レベルで細々と続けざるを得なかった。

しかし時代はある日突然一変する。それは LSI の出現であった。ノート 1 冊分だった PCM 符号・復号器が小指の爪の先ぐらいに小型化された。世界各国は一斉にデジタル交換機の開発を進めた。我が国は研究開発中止宣言のあおりを受けたせいか、残念ながら諸外国から 2、3 年の遅れをとってしまった。

我が国で最初に商用化されたものは D60 形デジタル交換機であり、1982 年のことである。研究開始から実用化まで 20 年以上の月日を必要とした。交換機の

デジタル化により伝送と交換を一体化するデジタル統合網が実現された。各種通信メディアの総合化が可能になった。交換機が小型化されて局舎不足の問題も解決され、通信網の拡大発展にも貢献した。

デジタル交換機の研究に携わってきた者の感想は、周囲条件はいつどう変わるかわからない。しかしものの本質さえつかんでおけばいつかは報われる。LSI の出現が時代を一変させた。システム屋もシステム屋が苦手なデバイス技術の動向には十分に注意を払う必要があること等々である。

データフロー制御交換方式の提案

当時、商用化されたデジタル交換機の制御系にはフォンノイマン形の計算機が使われていた。安全・信頼性に対する配慮を除けば通常の計算機とほぼ同様の構成である。当時はまだハードウェアコストが高い時代であったので機能は極度に集中化され、そのしわ寄せが制御プログラムの複雑化を招いた。ソフトウェア設計には多くの人手を要し、新規の交換設計の 80% がソフト設計に費やされた。通信サービスが多様化するにつれてこれがますます問題視されるようになり、ソフトウェアボトルネックと呼ばれた。

交換制御用のコンピュータは信頼性維持のために二重化はされているが、実質的には 1 台のコンピュータで呼処理、実行管理、障害処理などのあらゆる作業を実行しなければならない。しかもその作業内容は様々であり、障害検出、システム再構成、ダイヤル数字検出などの緊急性の高いものや、加入者線走査、課金処理、タイマ設定、復旧処理など時間的に余裕があるものも多い。これら様々の作業を 1 台のコンピュータでいづれくらいの周期で実行するかスケジュールリングが交換ソフトをいっそう複雑化させていた。

呼処理プログラムは空き状態、数字受信、呼出し中、通話中などの安定状態をもとにして、状態変化が検出されると状態遷移を実行するプログラムである。それぞれの遷移を行う処理プログラムをタスクといい、各種のサービスに対応するにはタスクの数は約 2,000 個にもなる。タスクをいちいち個別に作るのは大変であるので、基本動作を更に細分化して 100 数十種類のタスクマクロを共通に準備し、個々のタスクはそれに必

要ないくつかのタスクマクロを取り出しながら、つなぎ合わせるにより実行する(文献[4],[5]参照)。

少し前置きが長くなってしまったがいよいよ本題に入る。ソフトウェアボトルネックを解消するにはどうしたらよいか。より高級な言語の採用、ソフトウェアの階層構成、分散制御によるソフトウェア規模の適正化などいろいろな案が検討された。振り返ってみると昔のクロスバー交換機の制御系はレジスタ、マーカ、トランスレータなどに機能が分散化されており、条件がそろえば各装置間で処理データを持ち回りながら自律的に制御を実行していた。動作が簡明で分かりやすかった。一方当時、分散制御マルチプロセッサ形のデータフローコンピュータの研究も行われていた。この考えを交換制御に応用できないかと考えた。その結果として、クロスバー交換の簡明なアーキテクチャとプログラム制御の柔軟性を併せ持つ方式としてデータフロー制御交換方式を提案した。

図4にデータフロー交換制御の原理を示す。当時、マイクロコンピュータが市販されるようになったので分散制御エレメントPEにこれを使用することにした。プロセッサエレメントPE群は交換制御機能をタスクマクロなどの基本演算要素に機能分割したマルチマイクロプロセッサ系であり、相互に独立かつ並列に動作する。一つのPEに10数個のタスクマクロを収容すれば全体で10数個のPEで交換機能が実現できる。これらの基本演算機能は原則的には関数的であり、過去の履歴は含まない。

データフロープログラム(DF program)はメモリセル(MC)と呼ばれる記憶装置に蓄えられており、タスクマクロを組み合わせるタスクの構成を指定する。それぞれのデータフロープログラムはタスクに対応して組み合わせられたいくつかの命令セルからなる。各命令セルはPEのタスクマクロに対応している。図5は命令セルの一例で、オペレーションコード(OP)は演算機能の種類とそれを実行するPEのアドレスが、また制御コード(CTL)には入力情報の到着状況などが記入される。データ部はその演算に必要なデータが、またアドレス部には演算結果の格納先となるMC内の次の命令セルのデータ部のアドレスが記入されている。

今ある命令セルに必要なデータがすべて到着すると、この命令セルは実行可能になり(これを発火という)、命令セルが発火すると接続回路を経由してOPコードが指定する次のPEにトークンと呼ばれるパケットとして発

送される。このような動作でタスク処理に必要な複数のPE間を何度か往復することにより一連のタスクが実行される。

ノイマン形のプロセッサでは実行管理プログラムによるスケジューリングなどの複雑な処理が必要であるのに対して、データフロー制御では「その演算に必要なデータがそろったとき、かつそのときに限り自動的に実行される」ので、動作は全く自律的である。しかも制御の流れとプログラムの流れは一致しており分かりやすい。複数の命令セルが並行して発火することもできるので並列実行性も高い。PEは完全受動的で独立性も高

図4 データフロー交換制御の原理

図5 命令セルのフォーマット

く、システム構成の統一標準化も容易になる（文献 [5], [7], [8] 参照）。

ノイマン形のプロセッサを用いた従来の制御系では、交換ソフトは 1) 仕様の作成, 2) 状態図の設計, 3) 状態遷移図やタスクの詳細設計, 4) スケジューリングによる直列処理プログラム化, 5) 機械語への変換, 6) デバッグなどの工程を必要とした。特に機械語にして分かりにくい状態でデバッグしなければならなかった。この辺にソフトウェアネックの原因があったように思われた。これに対してデータフロー制御では 1), 2), 3) の 3 段階だけで済み、原理的には交換の知識だけで交換ソフトが作成でき、ソフトウェア設計工数は大幅に削減されて数分の一ですむことになる。

この方式を実際に試作してデータフロー制御電子交換機 DATAFLEX-1 と名づけ、1984 年にイタリアのフィレンツェで開催された電子交換国際会議で発表して一応の評価を得た。図 6 は試作機制御部の写真である。上部に PE, MC, 接続回路などが搭載されている。下部はスイッチ回路や外部装置とのインタフェース部である。この試作実験を通じてデータフロー制御の動作や特性を確認することができた。しかしながら、公衆通信網に使用される局用交換機はこのとき既に蓄積プログ

ラム制御によってほぼ完成されており、いまさら作り直すこともできず新規採用には至らなかった。研究にはタイミングが重要である。ややタイミングを失したのは残念であった。その後、我々と平行して日立製作所では白須宏俊博士を中心に同様の原理のシステムが開発され、私設交換機 PBX としてかなりの数のデータフロー制御交換機が実用に供せられた。

その他の研究

以上のほかにも我々の研究室ではいくつかの電子交換システムの研究を行った。与えられた紙数がほぼつきてしまったので、ここでは主な項目とそのときに得た感想などを示すにとどめる。

PCM 分岐挿入交換方式の提案

交換機の分散制御方式研究の一環として、PCM 分岐挿入交換方式の提案を行った。これは環状に張られた伝送路の途中数箇所にてデータの分岐挿入スイッチを分散配置したものである。まだイーサネットが発表される数年前のことで、今にして思えば環状・バス状 LAN のはりりであった。1968 年に試作機を作成してデータハイウェイと名づけた。その後 IC が実用化され、大企業が一斉に乗り出してきた。IC 技術をもたない大学レベルではとても太刀打ちできなかった。そのとき得た教訓は、企業と大学の役割は異なる、企業が出てきたら大学の役割は終わったものと解すべきであるということであった（文献 [9] 参照）。

ブロック伝送交換方式の提案

デジタル交換網では音声、テキスト、データ、画像などの各種メディアの統合化が可能になる。各種メディアの情報を一括してデータブロックに詰め込めばマルチメディア交換機が実現できると考え 1970 年にブロック伝送交換方式を提案した。今考えると非同期転送モード ATM の原型に近いものであった。理論的な検討はある程度進めたが、当時はまだ個別部品の時代でゲートよりもメモリが高い時代であった。大量にメモリを必要とするこの方式はとても物にはなるまいと途中で研究を諦めた。デバイス技術の将来動向に無知だった我が身に恥じ入っている次第である（文献 [10] 参照）。

図 6 データフロー制御電子交換機 DATAFLEX-1 試作機の制御部 (1984 年)

光交換方式の研究

電子交換の次は光交換ではなかろうかと考えた。新しいシステムの開発にはシステム屋とデバイス屋の協調が不可欠と考え、1987年に両者の交流を目的として本学会内に光スイッチング時限研究専門委員会を立ち上げた。我々の研究室でも小規模ながら液晶スイッチを用いたパイプライン構造の光交換機PPSを試作した。(株)フジクラからの御援助を頂き、1996年に米国特許を取得した(US Patent No.5,521,733)。波長多重光交換方式などシステム構成の理論的な検討も行った。研究会では活発な議論が行われ、部分的にはインターネットにも光スイッチング技術が導入されるようになってきたようであるが、本格的な光交換の実現は私の目の黒いうちはまだ無理ではなかろうかと諦めている(文献[11]参照)。

むすび

先日、「情報通信新時代の展望」と題するあるシンポジウムに参加した。そのときパネリストとして御登場になった著名な通信事業の経営者S氏のお話が耳に残って離れなかった。私流に解釈すると「現在の情報通信システムの研究開発はグリコのおマケのようである」とのことであった。昔グリコというキャラメルのある会社があり、飴の中身よりはオマケのおモチャの開発に力を入れた。子供たちはオマケに群がり、企業は業績をあげた。それになぞらえて現在の研究開発は、通信事業の本質から目をそらして目先のアプリケーションばかりにうつつを抜かし過ぎているのではないかということである。

そういえば国立大学が法人化され、教員には短期の業績が求められるようになってきた。時間を要する基礎的研究よりは目先の応用研究に走りがちになる。産学協同も盛んにいわれるようになった。しかし考えてみると、産と学の役割は違うのではないか。企業の目的は儲けることでありおモチャの開発も重要であろう。大学の目的は真理の追求である。企業の下請けになるというならいざ知らず、本来目的が異なる両者の協同には何か違和感を覚える。

目先の応用研究はその時の先端技術であり、研究者としても気分は悪くない。しかし時代はすぐ変わる。4、5年もすればあとに残るのは虚しさだけである。少なくとも大学の研究はほかの一つ覚えといわれようとも、もっ

と基礎研究に徹すべきであろう。余計なお世話だといわれそうであるが、先の短い年寄りの感想としてお聞き捨て下さい。

用語解説

PAM (Pulse Amplitude Modulation)

音声を8 kHzでサンプリングした後、標本値の振幅をそのまま伝送する方式。その後、ディジタル技術の進展に従い、振幅を量子化・符号化して伝送するPCM (Pulse Code Modulation)が主流となった。

文 献

- [1] 尾佐竹 伸, 秋山 稔, “AO-1 形全電子交換機並びに時分割方式の考察,” 信学誌, vol. 42, no. 4, pp. 401-407, April 1959.
- [2] 遠藤 諭, 計算機屋かく戦えり, アスキー出版局, 1996.
- [3] 尾佐竹 伸, 秋山 稔, “並列 PCM スwitching 方式,” 信学誌, vol. 43, no. 6, pp. 719-724, June 1960.
- [4] 秋山 稔, 近代通信交換工学, 電気書院, 1973.
- [5] 秋山 稔, 五嶋一彦, 島崎誠彦, デジタル電話交換, 産業図書, 1986.
- [6] 尾佐竹 伸, 秋山 稔, 高羽禎雄, 白戸憲光, 桐沢 潔, “実験用並列 PCM 電子交換機,” 信学誌, vol. 46, no. 10, pp.1402-1410, Oct. 1963.
- [7] M. Akiyama, M. Yamashita, and T. Misu, “DATAFLEX-1; An experimental data-flow computer controlled electronic switching system,” ISS'84, Florence, 23B-2, May 1984.
- [8] 山下幹夫, 秋山 稔, “データフロー制御電子交換機 DATAFLEX-1,” 信学論 (B), vol. J67-B, no. 6, pp.654-661, June 1984.
- [9] 秋山 稔, 中山俊彦, “PCM 分岐挿入交換方式とその再配置接続,” 信学誌, vol. 52-A, no. 11, pp.450-457, Nov. 1969.
- [10] 山口武彦, 秋山 稔, “多元情報のブロック伝送・交換方式,” 信学技報, SE70-46, Feb. 1971, SE71-5, May 1971.
- [11] M. Akiyama, K. Tada, and J. Mizusawa, “Photonic switching systems,” IEICE Trans., vol. E74, no. 1, pp. 84-92, Jan. 1991.

秋山 稔 (名誉員)

▶ 1955 東大・工・電気卒。1960 同大大学院数物系研究科了, 工博。1960 より東大・工・講師, 助教授, 教授を経て, 1993 より芝浦工大教授, 図書館長, 学術情報センター長, 評議員会議長などを歴任。本会では理事, 幹事, 評議員, 通信グループ運営委員長, 交換・情報ネットワーク・通信網の安全信頼性・光スイッチング各研究専門委員長などを務めた。瑞宝中綬章 (2006), 紫綬褒章 (1998), 東京都科学技術功労者表彰 (1993), 郵政大臣表彰 (1983, 1991), IEEE Fellow (1986), 本学会功績賞 (1999), 業績賞・小林記念特別賞 (1985, 1988), 論文賞 (1972, 1978), 岡部賞 (1967), 稲田賞 (1957), 映像メディア学会感謝状 (2001)。中国安徽省通信学会一等論文賞 (1988), 大川出版賞 (1994), 電気通信荒川賞 (1981), KDD 社長感謝状 (1983), 光産業技術振興協会功労者表彰 (1990), 日本 ITU 協会賞 (1999), ITC Lifetime Achievement Award (2005), 先端技術産業調査会功績表彰 (2005) などを受賞。