公衆通信網における交換システム技術の系統化調査

3

Historical Development of Switching System Technology for PSTN

川島 幸之助 *Konosuke Kawashima*

■ 要旨

今日の日常生活において、情報通信は欠かせないものになっている。広い意味での情報通信は、たとえば「のろし」により緊急連絡をするなど、古くから存在した。現代の情報通信は電気に依っているが、約 180 年前のモールスによる電信の発明に始まり、その約 40 年後に電話が発明された。その後の長い歴史を経て、今日の高度な情報社会を迎えている。

情報通信（狭義には、今は電気通信）において、人と人、人と機械、機械と機械の間の情報交換を担うのが交換システムである。電話の始まった約 140 年前には、その交換処理は人手により行われたが、20 世紀に入ると機械により自動化され、発展してきた。

本調査では、交換システム技術の進展を系統的に取りまとめて報告する。自動交換システムは、ステップバイステップ交換、クロスバ交換、電子交換と段階的に進展してきた。わが国においては、当初は、いろいろな技術分野と同様に欧米からの技術導入であったが、交換システムの自主技術開発の気概は常に旺盛なものがあった。とくに、第二次世界大戦前に世界で初めて電子交換機を試作するという、挑戦的なプロジェクトもあった。その後、長い空白の時を乗り越え、昭和 20 年代の後半には、クロスバ交換機を輸入し、これを契機に交換システム技術自主開発の機運が再び盛り上がった。さらに、電子交換システムの研究も並行して立ち上がり、国内の研究が活性化された。また、昭和 30 年代の初頭には、ディジタル電子交換の基本原理である、タイムスロット入れ替え方式や並列 PCM 交換方式が、わが国の研究者により発明され、昭和 40 年代以降のディジタル交換の開発につながって行った。

実用的には、経済性に優れたクロスバ交換機の開発に成功し、国内の通信環境の整備に極めて大きな役割を果たした。昭和 40 年代の初めのことである。並行して、電子交換システムの研究が続けられ、国際的にも多大な貢献をしつつ、アナログ電子交換機、ディジタル電子交換機を開発・導入した。欧米の先進技術をフォローしながら、少し遅れてそれを凌駕するシステムを作り上げるという、日本的ではあるが、先人の並々ならぬ努力の結果である。連綿として続いた交換システム技術の研究開発の結果、サービス総合ディジタル網（ISDN：Integrated Services Digital Network）の提供においては、遂に世界のトップに立った。本調査は、21 世紀直前までを対象とした。

■ Abstract

Information and communication technology is indispensable in daily life. Information and communication technology has existed since ancient days in such forms as the beacon, for example, for emergency communications. Today's information and communication technology relies on electronics. The technology started as the telegraph, invented by Morse around 180 years ago, and 40 years later the telephone was invented. We now enjoy the benefits of living in a world of advanced information communication thanks to technologies developed over many years.

Exchange systems enable information communication between people, people and machines, and between machines. Telephone exchanges began around 140 years ago operated by people, but in the early years of the 20th century, a switching system was invented by which exchange operations were executed automatically.

This report is a systematic study of the development of exchange system technologies in Japan. Automatic exchange systems such as the step-by-step, crossbar switching, and electronic exchange system were developed incrementally. In the early days, exchange systems were introduced from Europe and the United States, as were other technologies. However, researchers and engineers in Japan actively worked to independently develop exchange systems. Before World War II, there was a pioneering project for an experimental electronic exchange system: the first electronic exchange system in the world. Then, after many years of inactivity, crossbar switching systems were imported for technological tests in late 1955. This reawakened the desire in Japanese researchers and engineers to develop their own switching system. Moreover, research on electronic exchange systems began in parallel. As such, research and development for switching systems were very much activated in Japan. Then, in the mid-to-late 1950s, Japanese researchers invented fundamental technologies for digital electronic exchange in the form of the time slot interchange method and parallel PCM switching. These technologies led to digital switching system development after 1965.

The practical and economical crossbar switching system was successfully developed around 1965. The system played a very important role in improving the information and communication environment in Japan. In parallel to the development of the crossbar system, research on electronic exchange systems was continued and significant contributions to international standardization were made. After much work, an analog electronic exchange system was developed and introduced, followed by a digital electronic exchange system. Following the advanced technology of Europe and the United States, our predecessors succeeded in developing superior exchange systems by way of extraordinary effort, coming up from behind to eventually overtake in true Japanese style. As a result of many years of research on and development of exchange system technology, Japan was finally standing on top of the world in 1988, with the provision of Integrated Services Digital Network (ISDN). This survey studies switching technology up until just before the start of the 21st century.

■ Profile

川島　幸之助 *Konosuke Kawashima*

国立科学博物館産業技術史資料情報センター主任調査員

昭和44年5月	東京大学工学部計数工学科卒業
昭和44年6月	日本電信電話公社（現 NTT）入社、通信トラヒック研究部長等歴任
平成 5年3月	「通信トラヒック工学に関する研究」にて東京大学より博士（工学）学位受領
平成 9年7月	NTTアドバンステクノロジ株式会社入社、トラヒックリサーチセンター所長等歴任
平成14年4月	東京農工大学工学部 教授、総合情報メディアセンター長等歴任
平成24年4月	東京農工大学 名誉教授、首都大学東京 客員教授
平成26年4月	国立科学博物館 産業技術史資料情報センター主任調査員

■ Contents

1. まえがき …… 219
2. 通信網における交換システム …… 220
3. ステップバイステップ交換機 …… 225
4. クロスバ交換機 …… 229
5. アナログ電子交換機 …… 236
6. ディジタル電子交換機 …… 248
7. サービス総合ディジタル網（ISDN） …… 268
8. あとがき・謝辞 …… 273

交換機の系統図 …… 275
交換機の所在一覧 …… 276
交換機開発年表 …… 279

1 まえがき

現在、日常生活において、情報通信の果たしている役割はきわめて大きい。何をするにしても、ほとんど情報通信に依っていると言っても過言ではない。情報通信は、現在、電気によって行われているので狭義には電気通信と呼ばれる。電気通信の創始は、1837年の電信、1876年の電話の発明とされる。数多い相手の中から所望の人や機械に接続する技術が交換技術である。電話の発明の2年後には、交換機が開発された。これは、人手により発信者と着信者を接続する手動交換機であった。電話加入者数が増加するに従い、人手（交換手）による接続業務では作業の完遂が困難となり、機械式の交換機が出現した。

本報告書では、人手に依らない交換機、すなわち手動交換機に対して言えば自動交換機を対象に、わが国における交換システムの技術発展を系統的に調査する。

わが国においては、1923（大正12）年の関東大震災からの復興のために、初めての自動交換機が欧米からの輸入により導入された。それが、機械式のステップバイステップ交換機である。交換機の機能は、発信者と着信者を接続することにつきる。着信者は、電話番号で識別される。ステップバイステップ交換機は、電話番号を受信するたびに、順々に接続を着信者の方へ伸ばして行くという方式が取られた。この方式では、通信網としての柔軟性に欠ける、あるいは機械式接点のため保守・調整に労力が必要などの点で、発展性に乏しいものであった。ただし、それぞれの交換機がいわば分散制御をしているので、技術的には特徴あるシステムである。

その後、第二次大戦後の経済復興期に、それ以降の社会の発展に適した交換システムとしてクロスバ交換機が導入された。これは、1952（昭和27）年に電信電話業務担当組織が公社化されたのがひとつの契機である。クロスバ交換機の特徴は、ユーザの情報が流れる通話路スイッチと、それを制御する制御装置が分離されていることである。初期システムは輸入されたが、すぐに日本電信電話公社（電電公社）と交換機製造会社4社（沖電気、日本電気、日立製作所、富士通）との共同開発がスタートし、国産のクロスバ交換機が次々と開発された。ただし、具体的な導入に当たっては、ステップバイステップ交換機とのコスト比較が厳しく、昭和30年代には本格的導入には至っていない。最終的には、昭和40年代の初めに大容量のクロスバ交換機の開発に成功し、大量に導入された。

これと並行して、クロスバ交換機の制御装置をいわば交換専用コンピュータで実現する、アナログ電子交換機が研究される。これには、第二次大戦直後のコンピュータの発明と、その後の普及によるところが大きい。通話路スイッチとしては、クロスバ交換機と同様のクロスバスイッチを用いるので、ある意味では、方式技術は継承されることになる。さらに、通話路スイッチを電子化する、ディジタル電子交換機の研究開発へと進む。

本調査は、これらの電子交換機に重点を置く。研究開発の初期過程においては、常に欧米、とくに米国のAT&T（米国電話電信会社、The American Telephone & Telegraph Company）の動向・技術をフォローしながら進んできた。ただし、わが国において発明されたキーテクノロジー、あるいは研究試作された先進的技術も数多くある。たとえば一例として、ディジタル通信において信号をディジタル化して送信・交換するときのタイムスロット入れ替え原理は、猪瀬博（当時・東京大学）により発明された。これは、のちにディジタル交換の基本技術となった。とくに、それらの技術にも焦点を当てながら、調査を進める。電話交換機の最終形態としてのサービス総合ディジタル網（ISDN：Integrated Services Digital Network）の開発においては、ついに世界のトップに至った。それに至る技術の流れを系統的に調査するものである。本調査はISDNまでの技術をまとめる。

本報告書では、まず第2章で、通信網における交換システムの位置付けについて述べる。その後、上記の交換機の変遷の順に述べる。すなわち、第3章でステップバイステップ交換機、第4章でクロスバ交換機を紹介する。続いて、第5章でアナログ電子交換機、第6章でディジタル電子交換機について述べる。最後に、第7章でサービス総合ディジタル網（ISDN）を提供するシステムについて述べる。交換機には、企業内に閉じて使用されるものがあるが、本報告書では、一般公衆に利用される公衆通信網（PSTN：Public Switched Telecommunication Networkあるいは Public Switched Telephone Network）における交換システムを対象とする。

なお、その後、さらに交換技術の集大成を図った新ノードシステム（NS）が研究開発され導入されたが、本調査には含まれていない。さらには、21世紀になり劇的に発展・普及した、インターネットや移動通信に関する交換技術についても、含んでいない。

2 通信網における交換システム

電話が発明されてから 140 年足らずであるが、今や通信網を利用する人口は極めて多数である。まず、通信網の発展過程について一般的な考え方を述べる。つぎに、通信網の中での交換機の役割を述べる。とくに、当初は、人が接続処理をしていたが、交換の原理としてその手順を紹介する。さらに、わが国における交換機の変遷を概観する。

2.1 通信網の仕組み

通信網の構成要素は、端末、伝送路、交換機である。通信網への発展過程について述べる。図 2.1 に一般的な図を示す。まず、2 端末が 1 対 1 で通信するときは、図 2.1（a）に示すように単に伝送路を介して通信すればよい。これはいわばホットラインである。次に、さらに多数の端末同志を直接接続しているのが、図 2.1（b）である。なお、一台の端末に接続される伝送路は、回線と呼ばれる。このような接続形態で端末が多数になると、必要な回線数が急激に増加する。また、個々の回線の使用率が低下する。そこで、図 2.1（c）のように端末の間に交換機を設置し、交換機を経由して接続することにより、必要な回線数の削減を図ることになる。加入者と交換機を結ぶ回線を加入者線と呼ぶ。図 2.1（c）のように、加入者線を収容し、交換接続を行う交換機を加入者線交換機と呼ぶ。加入者が増加し、また地域的に分かれているとき、図 2.1（d）のように、それぞれの交換機の間を伝送路で結ぶことになる。この伝送路を中継線と呼ぶ。この場合、交換機は隣の交換機への中継機能を持つことになる。さらに、加入者が増加し地域も増えると、図 2.1（e）のように中継専用の交換機（中継交換機）を設置する。このようにして、通信網が発展していく。

図 2.1（d）の例では、ある地域から他の地域へ出る通信（トラヒックと言う）を、まとめて中継回線で運んでいる。これは、鉄道で言えば、ローカル線からターミナルを経由して新幹線に乗り、他の遠くの地域に移動することと似ている。ここで、情報の流れも、交通の流れと同じように、トラヒックと呼んでいる。区別するときは、「通信トラヒック」と言う。ローカルのトラヒックをまとめて中継回線で運ぶとき、いわゆる大群化効果が発揮できる。大群化効果とは、量がある程度あるならば、まとめて運ぶ方が効果は大きいということである。多重化利得とも呼ばれる [1)]。図 2.2

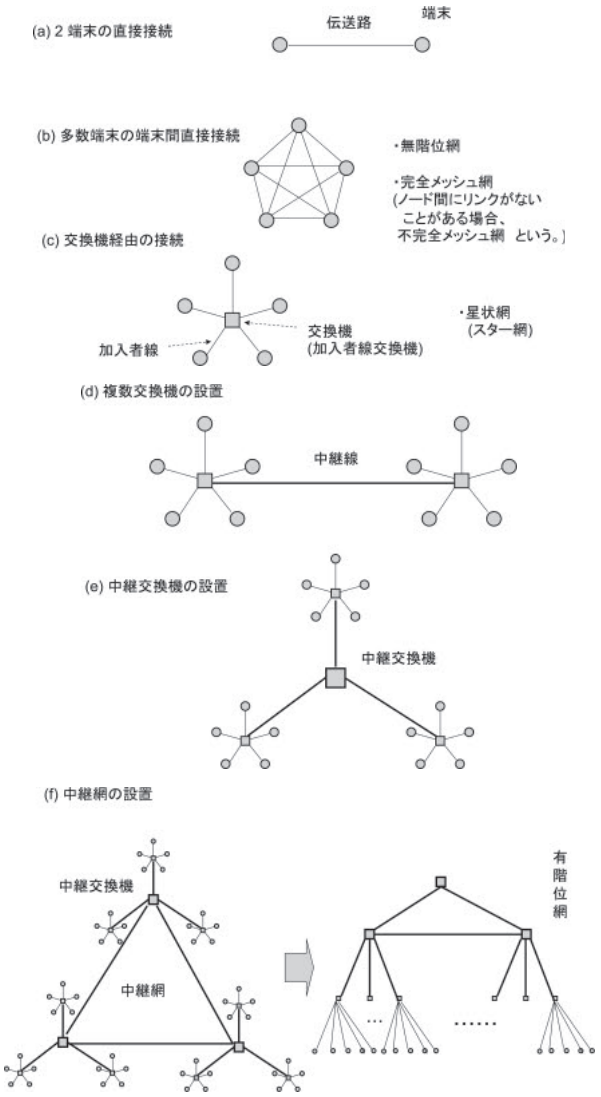


図 2.1　通信網への進化過程

に数値例を示す。なお、この数値を計算する公式は、1910 年代の初めに、デンマークの A. K. Erlang（アーラン）が導いたものである。この数値例では、まず、回線数が 10 の伝送路が 3 つある。それぞれの回線が全部使用中の時に到着した入力（呼）は、ロス（損失）になるとする。このとき、ロスの率を 0.01 とすると、それぞれの伝送路に 4.46 の負荷[註 1] を入力できる。回線使用率は 44.2% となる。次に、伝送路をすべてまとめて運用する。すなわち、回線数は 30 となる。同様に、ロスの率を 0.01 とすると、伝送路には 20.34 の負

註 1　単位は無次元であるが、トラヒック理論の始祖、A. K. Erlang（アーラン）にちなんで、アーラン（erl）と呼ばれている。

荷を入力でき、回線使用率は67.1％となる。合計では、同一の回線数でも、分割して運用するよりは、束にして（大群化して）運用する方が、より多くの負荷を処理できることになる。これが、上述した大群化効果である。規模の経済ともいわれる。この公式は、まさに、電話網における回線数の算出のためであった。

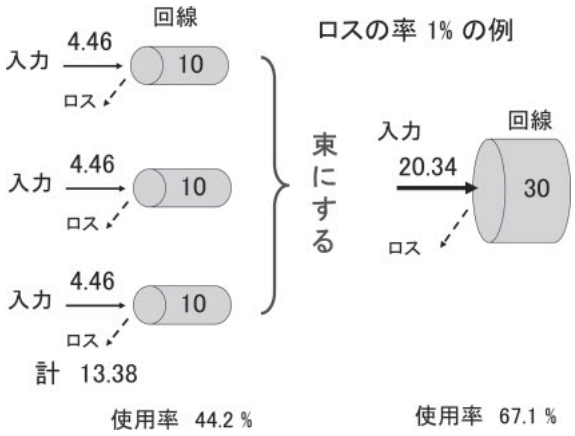


図 2.2　大群化効果の数値例

図 2.3 に従来の電話網の構造を示す[2]。これは、固定電話に対するものである。加入者を収容する電話局に設置される交換機は、加入者線交換機と呼ばれる。この電話局から加入者までは、加入者対応の固有の回線が設置されている。これを加入者線と言う。加入者線交換機から、他局の交換機に出ることを中継と言う。ここでは、回線は多数の需要（電話では呼と言う）に共用される。なお、携帯電話に対しては、交換機と通信端末の間に基地局が入り、基地局から端末までは無線となる。

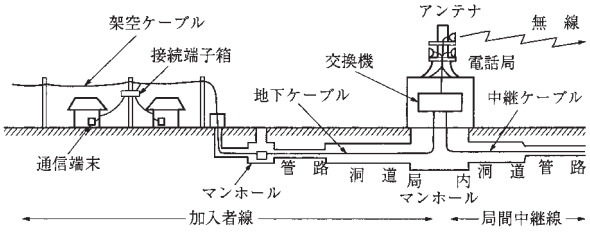


図 2.3　電話網の構造[2]

2.2　交換システムの役割

電話交換機は、多数の加入者の中から指定された相手を選び、その間に専用の通話路を設定するものである。1876（明治 9）年に電話機が発明されたが、その 2 年後には、交換手が接続コードを操作して、加入者間に通話路を設定する手動交換機が開発された。図 2.4 に、交換手が介在するときの交換処理の原理を示す[3]。図中の交換機の欄に示す手順で、交換手が交換機を操作して接続を行うことになる。実在の手動交換機と、交換手の動作イメージを図 2.5 に示す[2]。交換手が接続コードをジャックに差し込むことにより相手に接続される。接続コードが通話路で、交換手が制御装置に相当する。わが国では、1890（明治 23）年に、東京と横浜間で交換業務が開始された。手動交換機は、当初は、加入者側が磁石発電機を回して発呼を知らせる磁石式交換機であった。その後、交換機側に、加入者に共通に使用する電池を設置して、交換機側から通話電流を給電する共電式交換機に改良された。

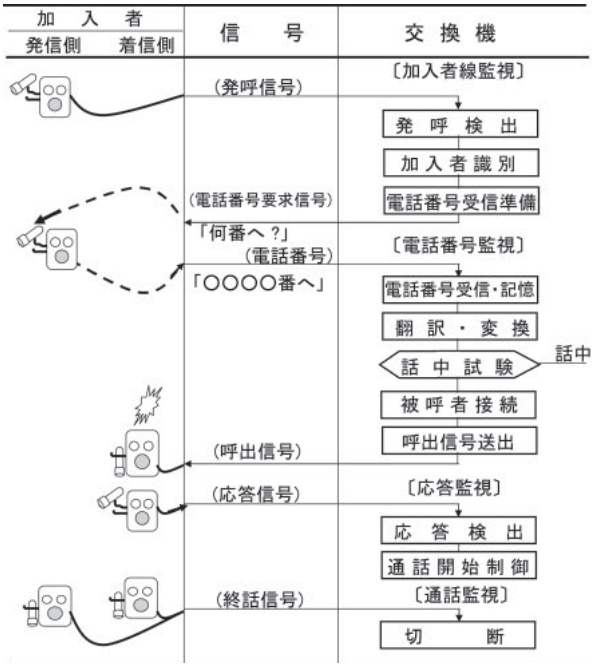


図 2.4　交換処理の原理[3]

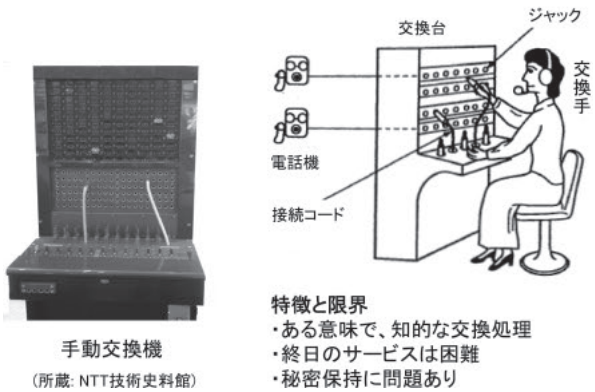


図 2.5　手動交換機と交換処理イメージ[2]

ところで、交換機の基本的な役割は、次の通りである。

・加入者からの発呼を検出して、相手先の電話番号を受信し、接続する。
・中継のみの場合は、入ってきた呼を適切な出中継回線に送信する。
・通信網内に送出するとき、相手電話番号や回線の使用状況により経路選択（ルーティング）を行う。
・多くの回線から来るトラヒックを集めて大束の中継回線に送出し、大群化効果を発揮する。
・料金の課金、障害処理、トラヒックデータの収集、管理業務等を行う。

交換機のスイッチングのイメージを図 2.6 に示す[2), 4)]。加入者線交換機には、加入者が収容されている。同一の交換機に収容されている加入者間の通信（呼）と、その交換機外へ出て行く通信、および他の交換機から入ってくる通信がある。また、中継交換機では、文字通り、入ってきた通信を他の交換機に中継する。

図 2.6　交換機のスイッチングイメージ[2), 4)]

2.3 交換システムの歴史概観

図 2.7 に、わが国における交換機の変遷を示す[5)]。横軸は、西暦で年度、縦軸は加入者線交換機に収容されている総端子数である。前節で述べた、手動交換機からディジタル交換機までの数値を示している。なお、2000 年の少し前に、新ノードシステム（NS：New Node System）が導入された。本調査では、ステップバイステップ交換機からディジタル交換機までの技術を系統的に調査する。

(1) 手動交換機

わが国においては、1890（明治 23）年に手動交換機が導入された。手動交換機では、交換手という人手によって交換接続処理が行われた。加入者数が増加するに従い、交換手の作業は膨大なものとなり、労務的に大きな問題となってきた。また、秘密保持に対する懸念もあり、交換処理の機械（自動化）への移行が大きな課題となった。図のグラフの中で、M が手動（Manual）交換機をさす。

(2) ステップバイステップ（S×S）形自動交換機

このような課題が顕在化する中、わが国では、1923（大正 12）年 9 月 1 日の関東大震災により東京・横浜

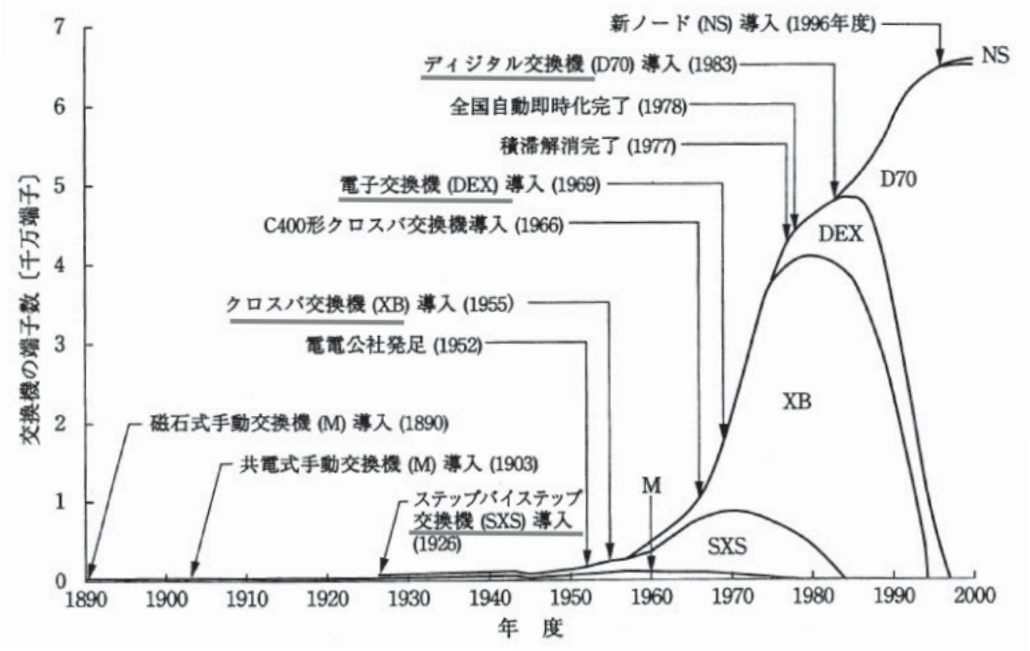


図 2.7　わが国における交換機の変遷（端子数）[5)]

（Copyright © 2006 IEICE, 許諾番号：14SB0039）

の通信施設が壊滅的な被害を受け、その復興のため、自動交換機の導入が決定された。そこで、欧米からステップバイステップ（S×S）形自動交換機が輸入され、1926（大正 15）年の初めに開局された。当初は輸入ではあったが、数年後には国産化された。ステップバイステップ交換機では、受信するダイヤル数字ごとに接続していくため、通信網としての発展性に欠けていた。また、機械的な上昇回転スイッチにより接点を選択するため、磨耗が激しいという欠点もあった。とはいえ、人手による保守・調整により長年使用され、1987（昭和 62）年 10 月に最終的なステップバイステップ交換機が撤去されるに至った。

（3）クロスバ（XB）形自動交換機

次に導入されたのが、クロスバ（XB）交換機である。なお、グラフからもわかるように、交換機の世代が、ある時点で一挙に移行するのではなく、通信網の中では異なる世代の交換機が並行して運用されている。第二次大戦後の復旧工事が一段落した 1950 年代になると、経済活動の活発化による市外交換自動化の要望も増え、S×S 交換機の性能上の欠点が目立つようになってきた。1952（昭和 27）年電電公社の発足を機に、クロスバ交換機が輸入され、1955（昭和 30）年 9 月にサービスを開始した。ただし、輸入の決定後すぐに国産化にとりかかり、昭和 30 年代には各種のクロスバ交換機が開発された。最終的には、1967（昭和 42）年に C400 形と称される大容量のクロスバ交換機が開発・導入された。このクロスバ交換機の完成と大量導入により、長年の課題であった、いわゆる積滞解消（1977（昭和 52）年）と全国自動即時化（1978（昭和 53）年）が達成された。なお、1995（平成 7）年 3 月には最後のクロスバ交換機が撤去されるに至った。クロスバ交換機では、すべての論理回路の構成がリレー間の布線（配線）で行われていた。すなわち、制御系は多くの論理素子の間を配線して回路を組むことにより実現していた。そのため、通信網の拡充や料金制度の改定には、膨大な配線作業を必要とした。

（4）アナログ電子交換機

そこで、この作業を解消し、またさらなるサービスの高度化のための方式として、電子交換機がクローズアップされる。クロスバ交換機では、マトリクス状に配置された電磁石で構成されるクロスポイント接点からなる通話路スイッチ（XB スイッチ）を、リレー回路による制御装置が制御した。第二次大戦後、電子計算機（コンピュータ）が発明され、昭和 30 年代後半からは徐々に普及が始まった。通話路スイッチとしては、クロスバ交換機と同様の装置であるが、制御装置にコンピュータを使用するアナログ電子交換機の開発が、コンピュータの研究開発と並行的に進められた。コンピュータではプログラムにより処理が進む。これを交換機にも利用するので、蓄積プログラム制御（Stored Program Control）と呼ばれた。1969（昭和 44）年に現場試験として運用開始され、1972（昭和 47）年からは本格的に商用サービスとして導入が始まった。電話サービスの他に、データ、画像、移動体通信などの新通信サービスの導入に大きな力を発揮した。図の中では DEX と記しているが、これは Dendenkosha Electronic eXchange の略である。また、大容量の交換機は D10 形自動交換機と称されるものである。この導入が始まる頃から、電子技術の発展は極めて速くなり、次のディジタル電子交換機の開発が進むことになる。アナログ電子交換機は、最終的に 1997（平成 9）年 12 月に撤去された。

（5）ディジタル電子交換機

人が見聞きする情報はアナログであるが、この情報をすべて 0, 1 のディジタル情報で表現し、記録、通信に利用するという試みは、ある意味では、通信の始まりであった。すなわち、1837 年に発明されたモールス信号による電信は、ディジタルそのものであると言える。その後、アナログ信号のディジタル化に欠かせない標本化理論、パルス符号通信（PCM：Pulse Code Modulation）、あるいはまた情報理論などの発明・進展により、ディジタル通信が始まった[6)]。また、第二次大戦後すぐ、トランジスタの発明やコンピュータの発明があった。これらの素子や機器により、ディジタル信号のまま交換をするディジタル電子交換機の研究が、第二次大戦後に開始された。わが国では、昭和 30 年代の終わりに、本格的なディジタル交換機の研究がなされたが、素子のコスト高のため実用化には至らなかった。それが、昭和 40 年代後半からの LSI（Large Scale Integration）の劇的な進歩により、素子の大幅な高性能化・コストダウンが実現し、ディジタル交換機の開発が進むことになった。1982（昭和 57）年に中継用の D60 形ディジタル交換機が商用化され、翌 1983 年には、加入者線交換用の D70 形ディジタル交換機が商用化された。ところで、すべての情報を 0, 1 により表現できるので、ディジタル交換機ではあらゆるメディアの情報を流せるといえ

る。そこで、一本の加入者線から各種メディアを通信網に流すサービス総合ディジタル網（ISDN：Integrated Services Digital Network）の概念が1970年頃に生まれていたが、D70形ディジタル交換機に付加するISDN用のモジュールを開発し、ISDNサービスが提供された。これは、1988（昭和63）年4月のことであり、世界で最初の商用サービス開始であった。

本調査はここまでの技術をまとめる。その後、さらに交換技術の集大成を図った新ノード（NS）が研究開発され、1996（平成8）年に商用導入された。また、21世紀に入りインターネットが爆発的に普及し、移動通信技術の劇的な進展による携帯電話、スマートフォン（スマホ）の普及とあいまって、今日の情報社会が実現している。

参考文献

1) 川島幸之助（監修），塩田茂雄，河西憲一，豊泉洋，会田雅樹，待ち行列理論の基礎と応用，共立出版，2014.
2) 秋山稔，情報交換システム，丸善，1998.
3) 愛澤慎一（編著），やさしいディジタル交換，電気通信協会，1983.
4) 五嶋一彦，北見憲一，情報通信網［第2版］，朝倉書店，2007.
5) 電子情報通信学会「技術と歴史」研究会編，電子情報通信技術史―おもに日本を中心としたマイルストーン―，コロナ社，2006.
6) 青木利晴，行松健一，佐藤健一，ディジタル通信，電子情報通信学会誌，vol.83，no.1，pp.23-27，2000.

3 ステップバイステップ交換機

手動交換機では、交換手により処理が行われる。そのため、24時間サービスや秘密保持の点で問題があった。電話機が発明されてから、ほどなく問題が顕在化し、交換処理を機械に任せる自動交換機が発明された。ここでは、手動交換機に続いて導入されたステップバイステップ交換機について述べる[1)]。

3.1 その歴史

米国のアレキサンダー・グラハム・ベル（A. G. Bell）が1876（明治9）年に電話機を発明し、早くも1878（明治11）年の初めには、米国ニューヘブンで電話交換業務が開始された。わが国では1890（明治23）年12月16日、東京と横浜で、初めて公衆通信としての電話交換サービスが開始された。手動交換機により、交換手という人手によって交換接続処理が行われた。加入者数が増加するに従い、交換手の作業は膨大なものとなり、労務的に大きな問題となってきた。要員の定着率はきわめて低いものであった。また、秘密保持に対する懸念などの問題もあり、交換処理の機械（自動化）への移行が大きな課題となっていた。

自動交換機の実現は、電話機が発明された1876年の直後から種々試みられ、1889（明治22）年には米国のA. B. ストロージャ（A. B. Strowger）が、ステップバイステップ（Step by Step）方式を発明した。さらに、1905（明治38）年に米国AEI社（Automatic Electric Inc）が、本格システムを開発した。欧州では、1909年に、ドイツのシーメンス・ハルスケ社（Siemens & Halske AG）が国産化（H形と呼ぶ）し、1918（大正7）年には、英国のATM社（Automatic Telephone Manufacture Co.）が国産化（A形と呼ぶ）するに至った。

わが国においては、手動交換における上記のような課題が顕在化する中、1923（大正12）年9月1日の関東大震災により京浜地区の通信施設は壊滅的な打撃を受けた。これを契機に、通信を主管する逓信省は、通信設備の復興を図るため自動交換機の導入を躊躇なく決定した。すなわち、「当初設備に要する経費は約1倍半を要するが、その維持費は手動式の5分の1になり、その他、手動交換方式の短所をクリアできる」との考えであった。すなわち、自動機械化することによる運用費の大幅な削減は当然ながら、労務面、秘密保持の面でも効果が大である。なお、大震災の前には、既に中国・大連においてA形交換機の商用試験（図3.1）が行われ良好な結果が得られていた[2),3)]。

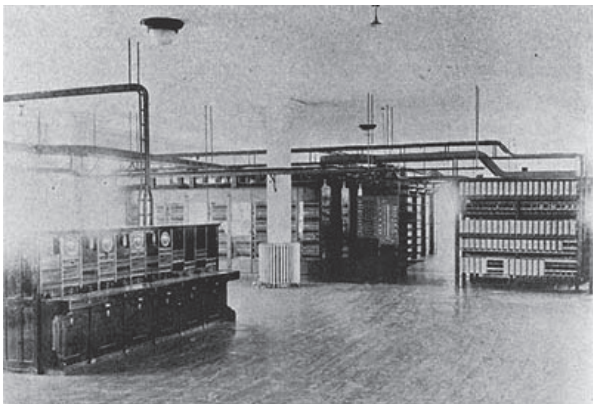


図3.1 最初のステップバイステップ式自動交換機（ATM社）（中国・大連）[3)]

各種方式の比較検討の後、保守面を重視する方式統一論と、競争によるコストダウンを重視する複数方式論があったが、A形、H形の2方式を導入することが決定された。かくして、1926（大正15）年1月にA形交換機が東京・京橋局において開局され、2ヶ月遅れてH形交換機が横浜・長者町局おいて開局された。製造メーカは国産化に努力し、1930（昭和5）年には国産A形交換機が東京・中野局（図3.2）において、1934（昭和9）年には国産H形交換機（図3.3）が、神奈川・鶴見局においてサービスを開始した。A形交換機は、日本電気株式会社、H形交換機は富士電機製造株式会社によるものである。なお、富士電機のルーツは、古河電気工業とジーメンスである。会社名は両社の頭文字からとったものである。通信機製造部門が独立して、富士通株式会社となった。

世界主要都市における自動交換機の導入は、ロンドンが1912年、ニューヨークが1922年、パリが1928年であり、この英断により、わが国の通信事情は急速に先進主要国のレベルに並んだといえる[4)]。

国産自主技術として、A形、H形両方式の利点を採入れ、T形（逓信省形）が開発され、1940（昭和15）年奈良局に採用された。この交換機はわが国の標準方式として広く採用される予定であったが、戦争激化により普及を待たず終戦となった。第二次大戦後は、大きな被害を受けたA形、H形両方式についてわが国独自の工夫により機能改善を図りながら、通信復旧の主役として活躍させた。すなわち、品質改良委員会の

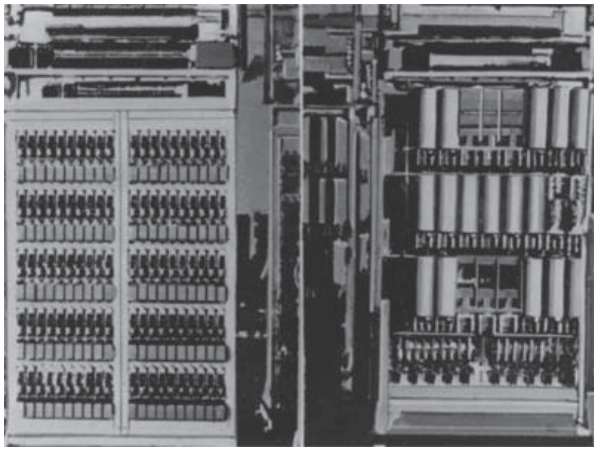


図 3.2　国産 A 形交換機（中野局）[3)]

図 3.3　H 形交換機
（所蔵：富士通沼津工場．復元されたもの）
出典：http://www.hct.ecl.ntt.co.jp/about/ob_04.html（参照：2014.5.6）

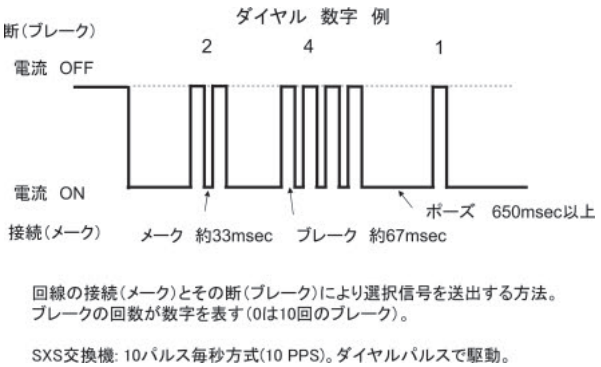
もとスイッチの製造精度や材料の改善が図られ、保守に要する時間が半分以下に削減された[7), 8)]。これは、米国のベル研究所では、継電器の寿命の目標は、40 年間無事故使用に耐えることであるとの記述に触発された技術者たちの努力の賜物である。また、のちに品質管理の分野において独創的な手法を開発し、世界的に著名になった田口玄一は、当時、電電公社の電気通信研究所に勤務していた（1950 年から 1962 年）。田口の貢献も大きかったことと推察される。

ステップバイステップ方式は、第 4 章で述べる、次世代の国産自主技術として出現するクロスバ交換機の出現により、主役を降りることになる。最終的には、1987（昭和 62）年 10 月 20 日、相模原・橋本局の運用停止により、その使命を終えた。実に 60 年あまりの長きにわたり、ほぼ昭和時代の全期間、わが国の通信を支え続けた。

3.2　ステップバイステップ交換技術の特徴

ステップバイステップ交換機では、加入者からのダイヤルパルスが 1 桁ずつ送られてくるたびに順次通話路の接続路を閉成していき、所望の相手に接続するという進行形の接続方法が採られている。そのため、ステップバイステップ（Step by Step）方式と呼ばれ、古くは段々式といわれていた。通話路部と制御部が一体となっている直接制御方式である。

電話加入者と、収容されている電話局との間で送られる信号の形式や送信方法を加入者線信号方式と言う。電話機とネットワークのインタフェースを規定するものであり、どのようなネットワークであれ、必要かつ重要である[9)]。電話機のオフフック／オンフック、すなわち、ハンドセットの上げ／下ろしによって加入者回線のループが閉成／開放される。これにより、電話局側のマイナス 48V 電源から電流が供給される。閉成された加入者線上を、加入者側の回転ダイヤルによって断続するダイヤル数字に相当する数のパルスが送られてくる（図 3.4）。その速度は、10 パルス／秒（10PPS）、各パルスの時間幅は約 33ms（メーク率 1/3）、ブレークの時間は約 67ms で、ポーズは最低 0.65 秒である。このパルス数によって、次に述べる回転上昇スイッチを直接駆動する。機械の動作を保証するため、パルスに関する時間を短縮することはできない。なお、交換機相互の信号は、局間信号方式と呼ばれる。ステップバイステップ方式では、信号は通話用とは別の第 3 線により電流のオン／オフで送られる。



回線の接続（メーク）とその断（ブレーク）により選択信号を送出する方法。
ブレークの回数が数字を表す（0は10回のブレーク）。

SXS交換機：10パルス毎秒方式（10 PPS）。ダイヤルパルスで駆動。

図 3.4　ダイヤルパルス（例）

主要なスイッチは回転スイッチと上昇回転スイッチである。回転スイッチ[5]は、図3.5に示すように、バンク（bank）と呼ばれる出線の接点が半円状に配置されたものと、その接点に接触しながら回転するワイパ（wiper）から構成される。ワイパには入線がつながっていて、ワイパが回転して出線を選ぶ機構になっている。つぎに、図3.6に上昇回転スイッチ[6]の構成を示す。スイッチは接点部と制御部が一体の構造となっており、1つの入線に対し出線が100本程度出る構成となっている。加入者のダイヤルパルスにより上昇電磁石が断続し、ワイパ（wiper）をダイヤルパルスの数だけ上昇させる。所定の数だけワイパが上昇すると、次に回転電磁石が働きワイパを横方向に回転させる。ワイパは出線の接点が多数配列されている接点組（バンク）と接触しながら回転（摺動）し、空いている回線（出線）を探し、空いている出線の位置で止まり回線を捕捉する。図3.7はその概念図であり、図3.6の通話路スイッチの部分を模式的に示したものである。各レベルの出線は図3.6に示すように10本である。

このようにステップバイステップ交換機ではダイヤルパルスの桁ごとに出線選択を繰り返しながら接続路を順次延ばしていく。図3.8にそのイメージを示す。A形とH形の制御方法は基本的に同一である。図3.8に示すラインスイッチはA形の場合であるが、H形は少し異なる構成となっている。セレクタ以降は、両者同一の制御構造を採っている。

なお、参考のため、A形、H形の2方式のセレクタスイッチが配架されている様子を図3.9に示しておく。

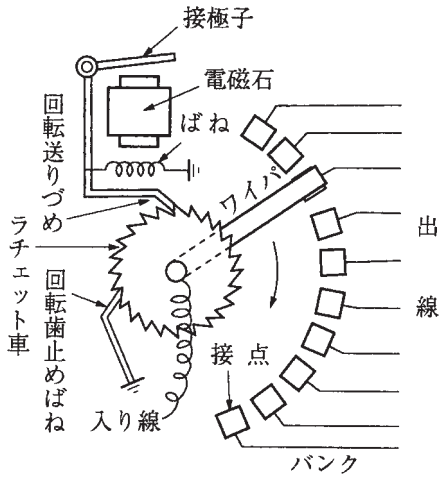


図3.5　回転スイッチの構成[5]

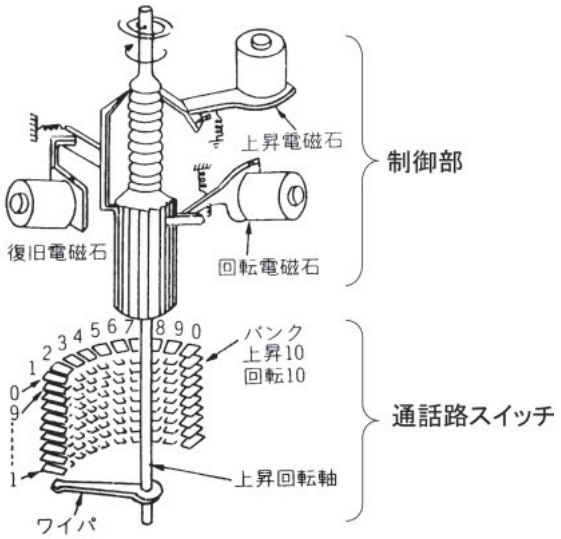


図3.6　上昇回転スイッチの構成[6]

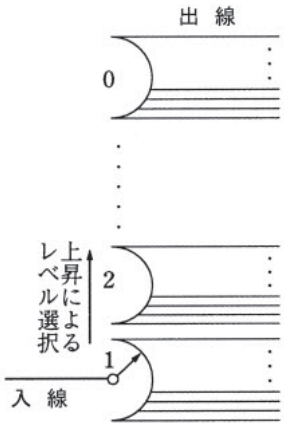


図3.7　通話路スイッチ部の機能概念図[5]

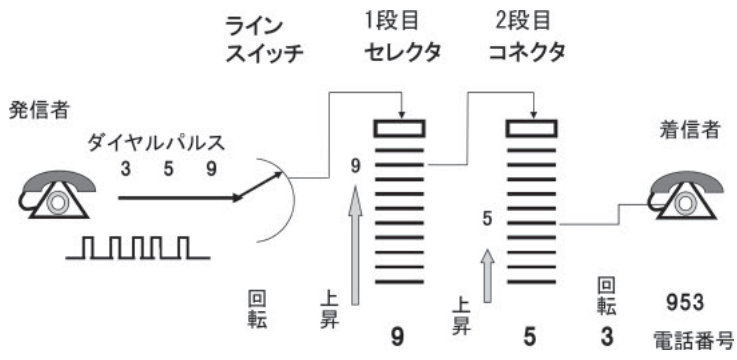


図3.8　ステップバイステップ交換方式のイメージ

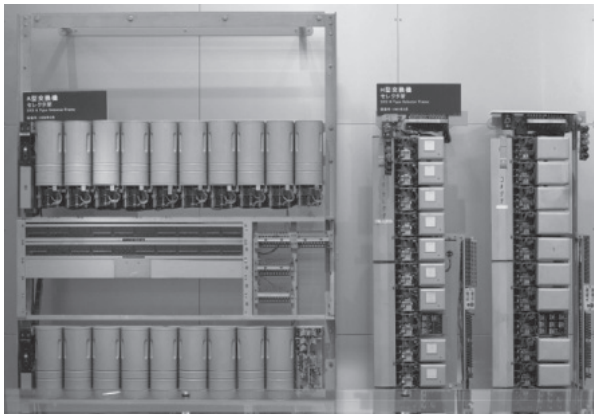


図 3.9　ステップバイステップ交換機 – A 形（左）と H 形（右）（所蔵：NTT 技術史料館）

本方式においては、出線数は少ないものの、空き出線の探索方式、出線の使用率の平準化、多数の入線で出線を共用する構成、などの工夫がされていた。所要スイッチ数の算出は厳密には困難なため近似計算で行われていたが、正確な算出はできなかった。そこで、疑似トラヒック実験方法が考案され、装置が製作された[10]。これは、当時・東京大学大学院生の猪瀬博によるものである[11), 12), 13)]。なお、この成果が、米国ベル研究所からも認められ、猪瀬がベル研究所にコンサルタントとして招へいされることになった。その滞在が、第 6 章で述べる、猪瀬のディジタル交換の基本技術の発明につながることになる。

本方式は、上述のように長期にわたり使用されたが、下記のような長短があった。

・長所

(1) 同類の機器の集合でシステムを構成できるという簡明さがある。

(2) 制御機能と通話路スイッチが対応している直接制御方式をとっているので、故障が全体に波及しない。いわば、超分散処理システムとなっている。

・短所

(1) 電話番号と交換機の配線が固定的に対応しているので、番号によって経路が定まってしまい、経路設定に柔軟性がない。

(2) 接続動作はダイヤルの数字情報ごとに一つずつのセレクタが番号をつかんで接続していくので、接点が摩耗し雑音を発生しやすい。また、調整保守が必要である。

(3) ダイヤルの桁（けた）間に機械的な摺動で空き回線を選択する構造であるため、回線の選択範囲は 10 回線程度となり、回線の大群化による回線使用率の向上が図れない。（大群化効果を示す図 2.2 に対して第 2 章で述べたように、10 回線でロスの率（呼損率）が 0.01 のとき、回線使用率は 44%にすぎない。回線の 1 リンクに対する呼損率は通常 0.01 に設定されている。）

(4) 複雑な交換動作に対応しにくい。

今まで述べたように、ステップバイステップ方式においては、加入者からのダイヤルにより機器を順々に操作し通話路を設定していく、通話路部と制御部が一体となっている直接制御方式である。しかしながら、この方式では、交換機の操作速度が、人間と電話機の特性に左右されることになり、機器の動作速度に限界がある。また、人の操作の時間やダイヤルパルスの時間、制御機器を保留することになり無駄である。そこで、交換機の構成を通話の接続経路を形成する通話路部と、その接続制御を司る制御部に分離する技術が開発された。すなわち、ダイヤルをいったん蓄積してから接続すべきルートの回線を大群選択し、それと入線の間に経路を設定するという、いわゆる共通制御方式が交換機の主流となる時代を迎えることになる。

参考文献

1) 日本電信電話公社技術局（編），電気通信自主技術開発史　交換編，電気通信協会，1976.

2) 松尾松太郎，日本で最初に自動化した大連電話，逓信史話 上巻，電気通信協会，pp.402-409，1961.

3) 日本電気社史編纂室，日本電気株式会社百年史，日本電気株式会社，2001.

4) 城水元次郎，電気通信物語―通信ネットワークを変えてきたもの，オーム社，2004.

5) 秋山稔，情報交換システム，丸善，1998.

6) 愛澤慎一（編著），やさしいディジタル交換，電気通信協会，1983.

7) 渡辺孝正，現在自動交換の直面している諸問題，電気通信学会雑誌，vol.37，no.2，pp.85-90，1954.

8) 渡辺孝正，自動交換四十年の経験，逓信史話 下巻，電気通信協会，pp.39-48，1961.

9) 葉原耕平，清野浩一，高橋達郎，電話交換システム，電子情報通信学会「知識ベース」，5 群－4 編－2 章，電子情報通信学会，2010.

10) 猪瀬博，文化としての科学技術を考える，三田出版会，1990.

11) 猪瀬博，抵抗体雑音を利用した疑似通信呼発生装置，電気通信学会誌，vol.36，no.4，pp.177-181，1953.

12) 猪瀬博，定位形交換線群擬似電子装置，電気通信学会誌，vol.37，no.6，pp.398-402，1954.

13) 猪瀬博，二群階段結線群の特性―理論的呼損率表と擬似トラフィック実験結果―，電気通信学会誌，vol.37，no.7，pp.476-480，1954.

4 クロスバ交換機

ステップバイステップ交換機では、交換処理が機械的な動作により行われるため、性能上・機能上の限界があった。海外では、その打開のため、第二次世界大戦の前から、クロスバス交換機の開発が始まっていた。わが国においては、第二次世界大戦による電話網の停滞状況からの復興を図るとともに、戦後数年後からの経済の広域化に対応するため、クロスバ交換機の導入、開発が始められた。本章では、クロスバ交換方式の特徴、ならびにわが国での開発から大量導入までの歴史を述べる[1),2),3)]。

4.1 その歴史

クロスバスイッチは、後述するように、電磁石の動作でマトリクス状に配置されたクロスポイント接点を閉じるようにしたものである。1915（大正 4）年に米国ウエスタン・エレクトリック社のレイノルズ（J. N. Reynolds）がこの機構を発明した。さらに、1919 年スウェーデンのパルムグレン（N. Palmgren）とヴェツランデル（G. A. Betulander）はクロスバスイッチの改良版を発表し、スウェーデン電気通信管理庁はこのスイッチを使った小自動交換機を実用化した。

1938（昭和 13）年、米国においてベルシステムが、クロスバスイッチを用いた No.1 方式を発表した。本方式が発表されると、その共通制御という方式構成とともに、クロスバスイッチの持つ、低雑音、長寿命といった優秀性がたちまち明らかとなり、全世界の自動交換技術者の注目の的となった。並行して、市外接続の自動化を図るため開発が進められていたが、1943（昭和 18）年に市外交換用として最初の No.4 クロスバ交換機がフィラデルフィアで商用に入った。第二次大戦の影響の比較的少なかった米国では、さらに、クロスバ交換方式の改良・開発が進められた。市内交換用として、通話路の単純化を図る方式が考案され、1948（昭和 23）年に No.5 クロスバ交換機がペンシルバニア州の一都市で開局された。さらなる機能充実の後、1951 年には、全米的に導入された。

わが国において、第二次大戦後の通信の復興は、ステップバイステップ交換機によって行われた。この間、交換機自体の品質は向上したが、復旧工事が一段落した 1950 年代になると、経済活動の活発化による市外交換自動化の要望も増え、性能上の欠点が目立つようになってきた。1952（昭和 27）年電電公社の発足を契機に、初代総裁梶井剛より、通信事業の技術革新を行なうべきであるとの方針が打ち出された。その一つがクロスバ交換方式であった。しかし発足当初の電電公社にとってクロスバ方式は未経験の方式であり、早期導入のためには、またもや輸入に頼らざるを得ないところであり、1952 年末には、米国のケロッグ社から No.7 クロスバ交換機を輸入することが決定された。上述のように、ウエスタン・エレクトリック社（ベルシステムの製造会社）では既にクロスバ交換機を大々的に生産していたが、米国の独占禁止法の関係で輸出できなかった。そこで、米国ケロッグ社の No.7 形クロスバ交換機が購入され、1955（昭和 30）年 9 月、すべて群馬県内の高崎、倉賀野、安中の 3 局でサービスを開始した。

これに対し、輸入決定を受けた電電公社の中堅技術陣より、本方式はクロスバスイッチを一段ごとに加入者のダイヤルパルスで制御する方式で、共通制御とは呼べないものであり、わが国に望ましい方式を開発するべきであるとの反対が起こった。それを受け、輸入は実用化の参考のための試験的なものであるとの位置づけとなり、検討委員会が設置された。その結果、1953（昭和 28）年 9 月には、梶井総裁の下、国産クロスバ交換機の研究開発を開始することが決定された。以後、長い開発の歴史があるが、4.3 節で述べることにする。

なお、後年、梶井は、「将来電子交換方式が完成するという予想の下に、その前提としてクロスバ方式を採用した」と述懐していることは特筆すべきである[4)]。

4.2 クロスバ交換技術の特徴

クロスバ交換機の概略ブロック図を図 4.1 に示す。これは、最終的に方式として完成され、大量に導入された市内用の C400 形クロスバ交換機の例である。図のように、通話路スイッチと加入者回路、レジスタ（register）、センダ（sender）、マーカ（marker）および、トランク（trunk）から構成される。それらの機能は、次の通りである[5)]。また、レジスタには、発信レジスタと入りレジスタがある。

1. 通話路スイッチ：接続する端子間に通話路を作るスイッチ群。
2. 加入者回路：個々の加入者線の状態の変化を検知し、それをマーカに連絡する。

3. レジスタ、センダ：ダイヤル信号を記憶し、またダイヤル信号を送出する。
4. マーカ：回線相互、機器相互の接続動作を制御する。
5. トランク：2つの回線の接続点にあり、通話中に必要な電流の供給、通話回路の切断や復旧の監視を行う。

つぎに、代表的な例に対して、接続の順序を図 4.1 により述べる[5]。発信者、着信者を仮に図のようにする。

①加入者回路が、加入者が発呼した（電話機のフックスイッチが OFF 状態になった）ことを検出すると、それをマーカに知らせる。

②マーカは、その端子と空きレジスタ、センダとを接続する通話路を形成する。

③ダイヤル信号がレジスタに蓄積されると、それをマーカに転送する。

④マーカは、着信相手が自局内加入者であれば発信加入者、自局内接続トランク、着信加入者という接続路を通話路スイッチに作らせる。

⑤着信相手が他局に収容されている場合は、発信加入者、出トランクの接続路を作り、レジスタ、センダに蓄積されたダイヤル信号を次の局へ送出し接続を依頼する。

⑥他の局から入ってくるときは、入りトランクから信号がレジスタに蓄積され、その後は、上の④と同一である。

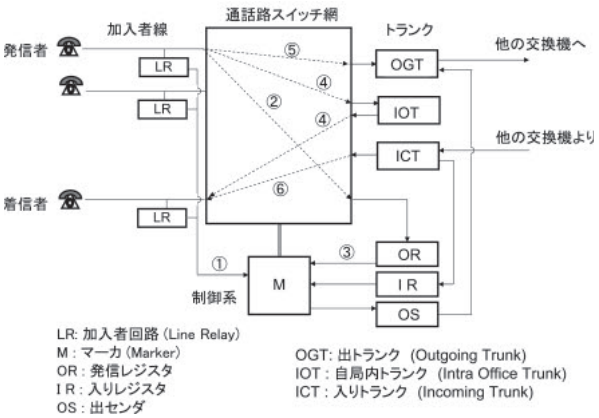


図 4.1　クロスバ交換機の概略構成と接続例
（参考文献[2), 5)] をもとに著者作成）

ここで、クロスバ交換方式における信号方式について述べる。上記のように、信号の受信／送信のために、レジスタ／センダが設けられている。まず、加入者線信号方式については、ダイヤル数字を受信する専用装置として発信レジスタトランク（ORT：Originating Register Trunk）が設けられ、発呼の時に ORT に接続してダイヤル数字を受信する。ORT としては、ダイヤルパルス（DP）を受信する DPORT と、プッシュボタン（Push Button：PB）の電話機から、音声帯域の二つの周波数の組み合わせを利用したダイヤル情報を受信する PBORT が設けられた。なお、ダイヤルパルスは、10 パルス／秒（10PPS）の他に速度を倍にした 20 パルス／秒（20PPS）の信号の受信が可能である。

局間信号方式としては、信号用のチャネルとして音声帯域（0.3〜3.4kHz）の外側の 3.85kHz を用いて必要な情報（信号）を送受する方式を採っている。これは、帯域外信号方式と呼ばれる。二つの周波数の組み合わせで生成された多周波信号（Multi Frequency：MF）方式である。わが国においては、クロスバ交換機開発がスタートした頃、1955（昭和 30）年 10 月に、帯域外信号方式を用いることが決定された[1)]。当時の AT&T では、帯域内信号方式を用い、2.6kHz があてられた。そのため、のちに、1970 年頃、擬似音声で信号を送り無料で電話をかけられる端末装置、いわゆるブルーボックスが出回り通信業者を悩ませることとなった[6)] [註2]。わが国において、ともすれば安易に外国技術が導入される風潮の中、議論の結果、帯域外信号方式の採用を決定した。まだブルーボックスのような問題が顕在化していないとき、この判断はまことに慧眼であった。

なお、ステップバイステップ交換方式やクロスバ交換方式では、通話路と同じ伝送路で制御信号を送受信している。これは、個別線信号方式と呼ばれる[13), 14)]。

通話路スイッチには、図 4.2、4.3 に示すようなクロスバスイッチが用いられている。開閉素子には特性が安定な貴金属接点が用いられ、格子（matrix）状に配列されている[15)]。選択電磁石には選択棒とよばれる横棒が、保持電磁石には保持棒とよばれる縦棒がつけられている。電磁石を駆動して縦棒と横棒を動かすことにより交点の接点を閉じる仕組みになっている[16)]。図 4.4 にスイッチの概念を示す。すなわち、n 本の入線（いりせん）と m 本の出線（でせん）に対して、n×

註2　現在、インターネットではハッカーが大きな問題であるが、これは、ハッカーの始まりと言ってよい。制御信号とユーザの通話（通信）を区別せず、同一の回線内（帯域内）を流していたために生じたものである。AT&T では、帯域内信号方式について、その紀要である BSTJ において詳細に発表している[7), 8)]。2.6kHz の信号を用いて電話の接続を制御できることは、大衆月刊誌 Esquire に掲載された[9)]。それにより、ますますいわゆるブルーボックスが流行した。このブルーボックスの問題は、学会誌では IEEE Spectrum にも紹介されている[10), 11)]。また、Apple の創業者も、ブルーボックスを自作し売っていたことを自伝で述べている[12)]。

m の交点を持つ格子を作り、交点に接点を配したものである。たとえば、入線 i と出線 j の交点の接点を閉じれば太線のように i から j への接続路が形成される。他の接続についても同様である。縦横の棒がクロスした形状からクロスバスイッチとよばれている。

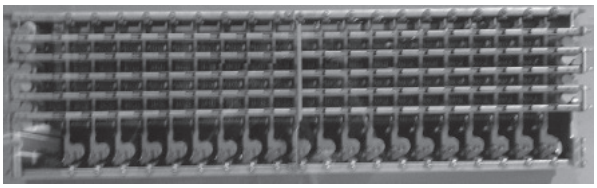


図 4.2　クロスバスイッチ
（出典：NTT 技術史料館展示品を著者撮影）

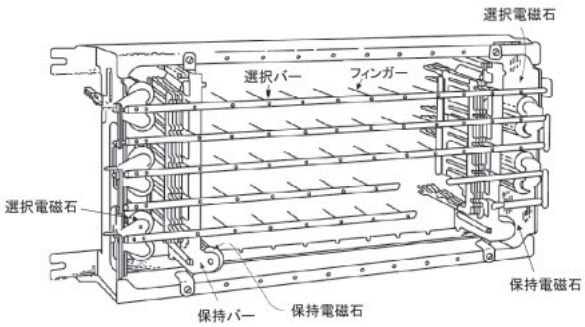


図 4.3　クロスバスイッチの構造
（出典：NTT 技術史料館 HP）

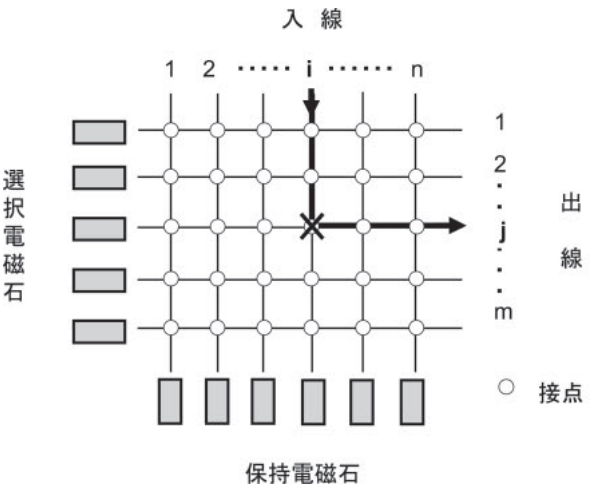


図 4.4　クロスバスイッチの概念図
（参考文献 [16] をもとに著者作成）

格子スイッチのコストはゲート数にほぼ比例する。ゲート数は格子サイズの 2 乗に比例して増大するのであまり大きなスイッチを構成するのは、コスト的によくない。そこで、大規模の通話路スイッチを作るためには比較的に小型のスイッチ（図 4.5）を多数組み合わせて構成するのが一般的である。たとえば、図 4.6 は格子スイッチを 2 段に配列して、ある入線からいずれの出線にも接続できるように配線した通話路スイッチ網である。スイッチとスイッチの間の配線をリンク（link）といい、この回路を 2 段リンク通話路スイッチ網という [17]。もっと大きな通話路スイッチ網を作るにはスイッチをさらに多段に配列した多段リンク接続通話路スイッチ網にすればよい。ただし、ある入線から目指す出線への経路において、他の接続によって閉塞されていることが生じうる。これを内部輻輳といい、その確率をある非常に小さな値、たとえば 0.001 に設定して設計する。それにより、大きな経済化が発揮される。

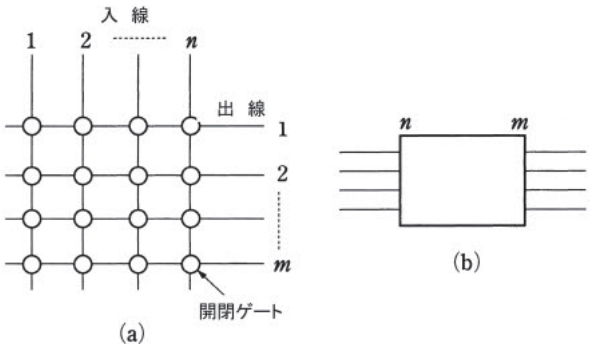


図 4.5　格子スイッチ（a）とその略記法（b）[17]

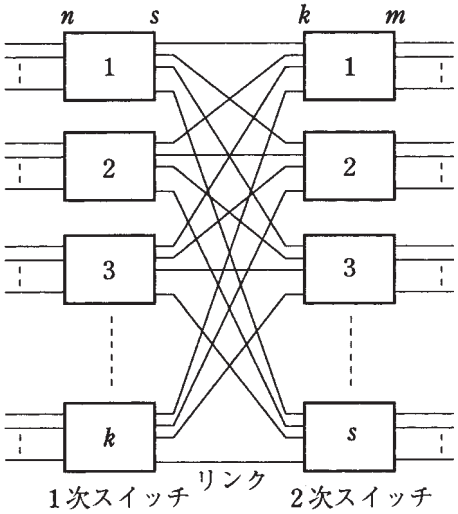


図 4.6　2 段リンク接続通話路スイッチ網 [17]

レジスタやマーカなどの制御装置は、図 4.7 に示す電磁リレーの組合せで構成される。電磁リレーは、電磁石の巻線に電流を流すと接極子が吸引されて接点を閉じる仕組みになっている。制御装置の動作は論理素子である複数のリレーの配線で定められる。電磁リレーのような基本論理素子が高速であるほど、1 つの制御装置の能力が高くなり、複雑な接続動作、多数のスイッチの制御が可能となる。

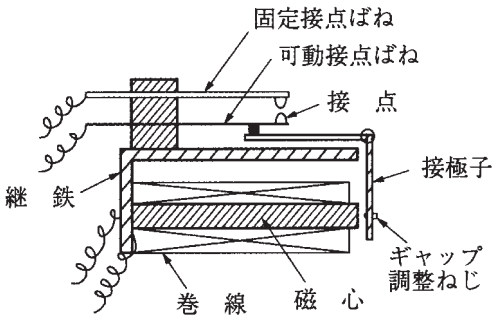


図 4.7　電磁リレーの原理 [17)]

電磁リレー間の配線（布線と呼ばれる）の仕方によって、いろいろな論理制御機能が実現できる。たとえば、図 4.8（a）のように直列接続すれば AND 回路が、図 4.8（b）のように並列接続すれば OR 回路ができる。電磁リレーの巻線に電流を流したときに接点を開く構造にしておけば NOT 回路ができる。これらを組み合わせればいろいろな機能をもった論理システムを構成することが可能になる。なお、わが国においては、スイッチング回路網理論に関して、1930 年代に中嶋章が先駆的な業績を残しているのは、まことに特筆すべきことである [18), 19), 20)]。これは、シャノン（Claude E. Shannon）の発表 [21)] よりも先んじている。

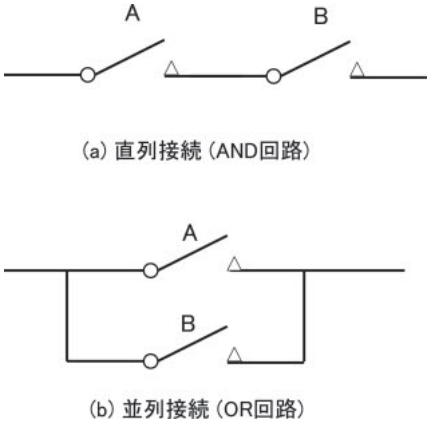


図 4.8　リレー接点による直列接続と並列接続

4.3　クロスバ交換機の開発推移

4.1 節で述べたように、1953（昭和 28）年、国産の公衆網用クロスバ交換機の開発がスタートした。電話需要の急速な増加から見て研究開発は急ぐべきであることより、次の方針で進められた。すなわち、スイッチ、継電器（リレー）等の主要部品については、外国で実用化されているものから選定して利用する、ただし、方式については、わが国に最適なものを新たに研究、実用化する、という方針である。

かくして、電電公社電気通信研究所（略称：通研）と交換機メーカ 4 社（沖電気、日本電気、日立製作所、富士通）[註 3] との共同研究開発がスタートし、1955（昭和 30）年には第 1 次試作が完了した。一方、電電公社の本社はクロスバ交換技術の振興を図るため交換機メーカ 4 社に発注し、1956（昭和 31）年 9 月に栃木県三和局 [22)] のサービス開始（図 4.9）を皮切りに、三重県香良洲、兵庫県六甲、山梨県竜王と開局した。これは国産クロスバ交換機の先駆けであり、のちに数百端子の小局に適用される C2 形クロスバ交換機へと発展した。

以後、規模、適用階梯（市内、市外（中継））などをパラメータとして、各種の方式開発、改良が重ねられた。アナログ交換機時代の全国電話網の網構成を図 4.10 に示す [2)]。接続先が同一の端局内あるいは同一の集中局内の場合は、2 線式回線が用いられる。それ以上の遠距離の場合は、通話信号を上り、下り別々に増幅する必要があり、回線は 4 線式となる。また、クロスバ交換機の最終的な標準機種を表 4.1 に示す [5), 23)]。

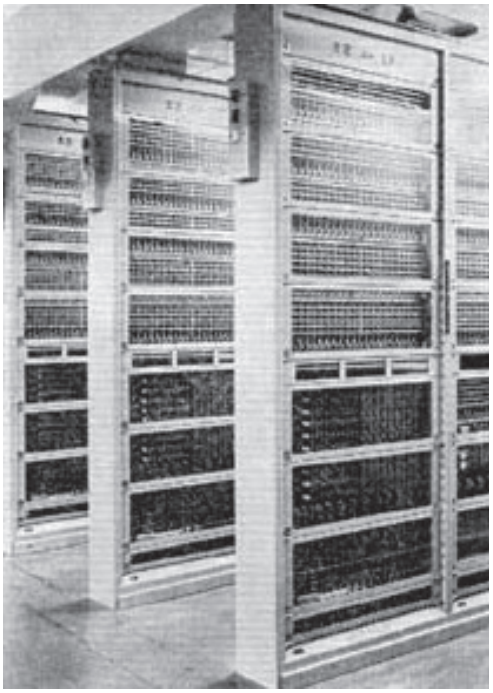


図 4.9　国産第一号小局用クロスバ交換機の商用化（栃木・三和局）[22)]

註 3　電電公社関連の交換機メーカ 4 社は、五十音順に記載した。ただ、奇しくも各社（あるいは通信機器部門）の創立順となっている。

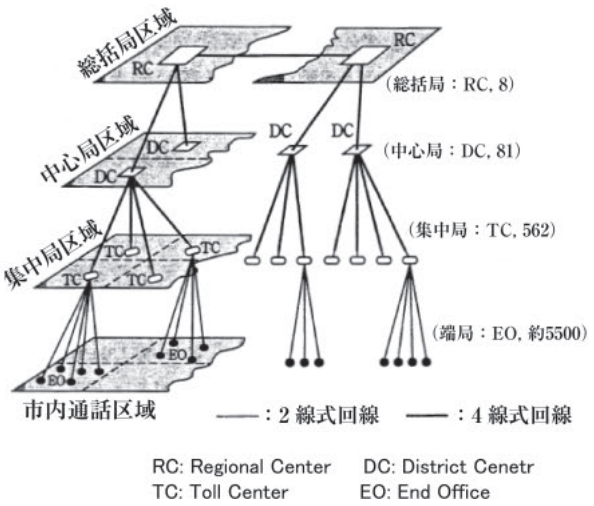


図 4.10　全国電話網（アナログ交換時代）の構成 [2)]
（Copyright © 2006 IEICE, 許諾番号：14SB0039）

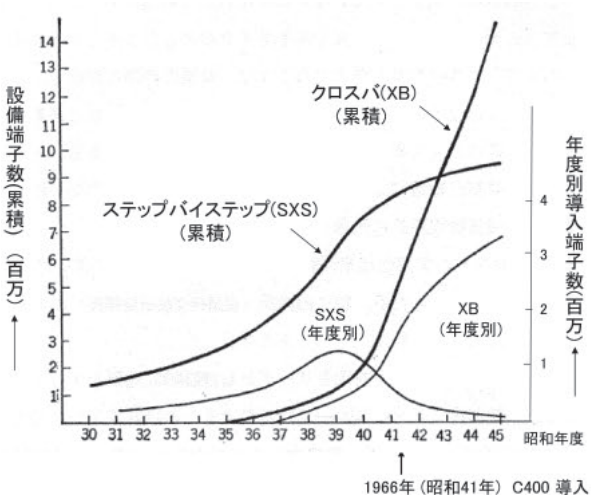


図 4.11　設備端子数（累積と年度別）
（参考文献 [24)] をもとに著者作成）

表 4.1　クロスバ交換機の標準機種

	機種分類	機種	回線容量	トラヒック容量（アーラン）	用途
加入者線交換機	C1	C14	400	22	端局・従局
	C2	C23	800	67	端局・従局
	C4	C460	12,160	544	端局・分局・中継
		C400	61,440	2,880	
中継交換機	C6	C63	3,200(入) 7,200(出)	1,880	中継
	C8	C82	4,000(入) 6,000(出)	1,880	中継

・C3, C5も開発されたが、最終的に標準とならなかった。

（参考文献 [5), 23)] をもとに著者作成）

このようなクロスバ交換機の研究開発と並行して、既存のステップバイステップ交換機においても、方式限界を有しつつも、大幅な経済化とスペース削減が進んだ。このような状況下で、新開発のクロスバ交換機の導入は顕著には進まなかった（図 4.11）[24)]。

そこで、経済性を図るためもう一度方式全体の見直しが必要となり、まず市外交換機の再検討が行われた [2)]。市外交換機に対しては、もともと、図 4.10 に示した網構成において、集中局用として C6 形が、中心局以上として C8 形が開発された。市外網が進展するに従い、県庁所在都市などの中心局に C8 形と C6 形を併設する場合が出てきた。そこで、C8 形に C6 形の機能を付与して 1 ユニットで構成する方法が考案され、1964 年に至って C82 形が開発された。また、C82 形の共通制御装置で C6 形の通話路を制御する C63 形が完成した。このように、両者は、使用トランク、共通機器等はほとんどすべて同一の回路を使用する統一機種であって、しかも従来の C8 形、C6 形に比し 3 割ものコストダウンに成功した。両交換機は全国に急速に導入され、市外の自動即時サービスの実現に至った。

市内交換機についても、抜本的な改良を図るべきことが、電電公社幹部会議において 1963（昭和 38）年末に決定され、約 2 年間にわたる検討の結果、C400 形と呼ぶ大局用市内交換機が出現することとなった。これは、コスト面でも、ステップバイステップ交換機に対して勝るものであった。また、数千端子の中局用として、通話路の規摸を小さくし、その他の装置も C400 形のものを縮小またはそのまま使用する形で C460 形交換機が開発された。1966（昭和 41）年の東京・西大森局（図 4.12）での試験運用の後、1967（昭和 42）年 4 月、東京の銀座局で 2 万端子の規模でサービスを開始した。以後、積滞解消の目標達成に向けて C400 形交換機が大量に導入されていった。C400 形クロスバ交換機は、当時において世界中で最も経済的で、かつスペース効率が最大の交換機となり、製造メーカから輸出された。C400 形交換機の当時の輸出累積額を図 4.13 に示す [25)]。なお、現存の C400 形交換機を図 4.14 に示す。

長い紆余曲折を経て実用化されたクロスバ交換機の大量導入により、1977 年度（昭和 52 年度）末には、「すぐつく電話」すなわち積滞解消を実現し、さらに、1978 年度（昭和 53 年度）末に「すぐつながる電話」すなわち全国自動即時化が達成されたのである。電電

図 4.12　大容量の C400 形クロスバ交換機試験運用（東京・西大森局）[22)]

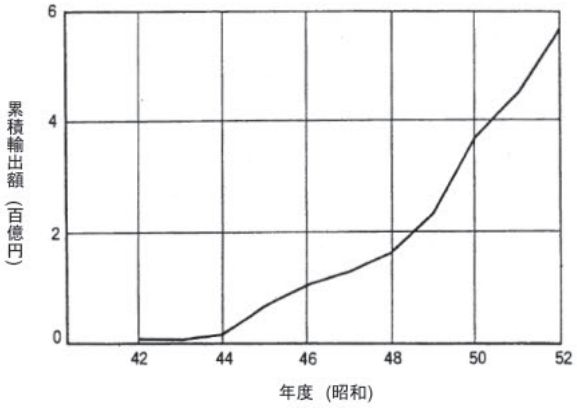


図 4.13　C400 クロスバ交換機の累積輸出額 [25)]

図 4.14　C400 形クロスバ交換機（所蔵：NTT 技術史料館）

公社が発足してから四半世紀の歳月が過ぎていた。クロスバ交換機は、最終的には、1995（平成 7）年 3 月 24 日宮崎県木城交換所での運用停止により、わが国における役目を終えた。

電電公社（1985 年以降は民営化）は、1984（昭和 59）年、日本政府からの要請により「クロスバ交換機」の中国への移転事業を開始した。以後、1993（平成 5）年まで 10 年にわたり、C400 形、C82 形、可搬形交換機等により約 33 万端子を移転して終了した。それまで手動交換方式が中心だった通信インフラの近代化と、工事・保守などを担う中国人技術者の育成に寄与したことは特筆される [26)]。

参考文献

1）日本電信電話公社技術局（編），電気通信自主技術開発史　交換編，電気通信協会，1976.
2）電子情報通信学会「技術と歴史」研究会（編），電子情報通信技術史―おもに日本を中心としたマイルストーン―，コロナ社，2006.
3）山内正彌，クロスバ交換機の発展，電気通信学会雑誌，vol.49，no.12，pp.2503-2521，1966.
4）梶井剛，クロスバ方式の導入，逓信史話 下巻，電気通信協会，pp.567-572，1961.
5）横井満，わかりやすい通信網，産報，1974.
6）葉原耕平，電気通信の歴史に学ぶ，電子情報通信学会誌，vol.72，no.5，pp.568-571，1989.
7）A. Weaver and N. A. Newell, In-band single-frequency signaling, Bell System Technical Journal, vol.33, no.6, pp.1309-1330, 1954.
8）C. Breen and C. A. Dahlbom, Signaling systems for control of telephone switching, Bell System Technical Journal, vol.39, no.6, pp.1381-1443, 1960.
9）R. Rosenbaum, Secrets of the little blue box, Esquire, pp.117-125, 222-226, October 1971.
10）M. Eleccion, Beating the blue-box bandits, IEEE Spectrum, vol.9, no.8, pp.52-58, 1972.
11）D. Flory, The great blue box phone frauds, IEEE Spectrum, vol.27, no.11, pp.117-119, 1990.
12）スティーブ・ウォズニアック（著），井口耕二（訳），アップルを創った怪物：もうひとりの創業者，ウォズニアック自伝，ダイヤモンド社，2008.
13）武田英夫，鈴木俊宏，交換用信号方式の現状と今後の課題，電子通信学会誌，vol.59，no.5，

pp.523-，1976.
14）寺村浩一，保坂務，信号技術，電子通信学会誌，vol.61，no.4，pp.414-420，1978.
15）城水元次郎，電気通信物語―通信ネットワークを変えてきたもの，オーム社，2004.
16）尾佐竹徇，秋山稔，交換工学，コロナ社，1963.
17）秋山稔、情報交換システム，丸善，1998.
18）山田昭彦，スイッチング理論の原点を尋ねて―シャノンに先駆けた中嶋章の研究を中心に―，電子情報通信学会 Fundamentals Review，vol.3，no.4，pp.9-17，2010.
19）中嶋章，スイッチング回路理論の思い出，電子通信学会誌，vol.53，no.12，pp.1658-1661，1970.
20）日本電気株式会社スイッチング回路理論編集委員会（編），スイッチング回路理論―日本電気における起源と発展―，日本電気株式会社，1989.
21）C. E. Shannon, A symbolic analysis of relay and switching circuits, Trans. AIEE, vol.57, pp.713-723, 1938.
22）日本電気社史編纂室，日本電気株式会社百年史，日本電気株式会社，2001.
23）電気通信技術研究会（編），新版電気通信概論，電気通信協会，1985.
24）福富礼治郎，わが国のクロスバ技術の発展，施設，vol.23，no.3，pp.46-54，1971.
25）城水元次郎，交換方式の実用化について，研究実用化報告，vol.29，no.3，pp.297-340，1980.
26）笠原正昭，丸茂泰彦，久保田重雄，中国へのクロスバ交換機移転の終結，NTT 技術ジャーナル，vol.5，no.12，pp.67-73，1993.

5 アナログ電子交換機

クロスバ交換機の完成と大量導入により、いわゆる積滞解消と全国自動即時化が達成された。しかし、クロスバ交換機ではすべての論理が布線論理で行われていた。すなわち、制御系は多くの論理素子の間を配線して回路を組むことにより実現していた。そのため、例えば、電話網の拡充に伴い新しい相手局が誕生すると、その都度ルーティング（経路の変更）、課金情報設定などのために、膨大な配線作業を必要とした。料金改定の際も同様で、全国レベルで、誤りなく実施するまでには数ヶ月から場合により一年近くという長期の時間を要した。そこで、この作業を解消し、またさらなるサービスの高度化のための方式として、電子交換機がクローズアップされる。

5.1 その歴史

世界で最初に電話交換に電子技術を応用しようとしたのは、ドイツのDTW（Deutcshe Telefonwerke）社である。1908年、ドイツ特許を出願している。これは選択素子としては光線とセレン光電池を用いて加入者の位置をマークし、通話路としては、回転形スイッチを用いる一種の半電子交換機である。このような試みはその後も散発的に行われたが、本格的な電子交換機というにはほど遠いものであった[1)]。

第二次世界大戦の前、わが国の通信技術の世界では、国産化への意気込みにあふれていた。とくに、搬送通信の分野では、松前重義による無装荷ケーブルの発明が画期的なものであり、これにより大陸との通信が容易となったのはよく知られている。ところが、交換機の分野では、自主技術による製造とは程遠いものがあった。それについては、1936（昭和11）年に、梶井剛が学会誌に「通信機器の國産化に就て」と題して寄稿している[2)]。その中から抜粋して次に示す。なお、当用漢字に変更した。

「優秀なる材料を海外に仰ぐ以外に通信機器の製作に当たりて外国特許に支配せらるることは通信機器の製造工業においては更に重大なる関係を有するのであって、材料の製造に関する特許、材料より機器を組立つべき理論ならびに構成方法等の特許に至るまでその範囲は極めて広範にわたっている。この特許の輸入は加工材料や機器そのものの輸入よりもはるかに重大なる無形の輸入品であって、この頭脳的資本たる列国のわが国における特許権に対し有効なる対策を立つるにあらざれば、わが通信機器製造工業の独立は永久に期待することを得ず、況んやわが通信機器の対外進出のごときは夢を見ることさへ不可能だと云はなければならないのである。」

このような中、1939（昭和14）年5月、逓信省工務局調査課長松前重義を中心として、日本電気株式会社、東北大学のメンバーを入れて、「自動交換方式に関する懇話会」が開始され、1942（昭和17）年には試作機が完成した。これは世界最初の全電子交換機と言ってよいものである。しかしながら、戦況の悪化や部品レベルの問題もあり、研究開発は中止となった[3),4)]。

第二次世界大戦の終了後、各国で電子交換機の実現のための組織的研究が始められた。とくに、米国ベル研究所では1952（昭和27）年ECASS（Electronically Controlled Automatic Switching System）方式を発表した。これは、通話路には冷陰極管とリードリレーを、制御部には真空管を用い、電話機にプリセットダイヤルを使用して一括動作により制御部の高速化、経済化をねらったものである。さらに、1954年DIAD（Drum Information Assembler-Dispatcher）方式を発表した。これはその制御部にドラムを使うことにより、同じく制御部の高速化、経済化を達成しようとしたものである。電子交換機に対する当時の各国の試みを表5.1に示す[4)]。

表5.1　空間分割電子交換機についての各国の試み[4)]

開発機関	システム	発表	通話路	制　御	蓄　積
米国　ベル研究所	ECASS	1952	リードリレー	放電管・リードリレー	放電管
〃　　〃	DIAD	1954	リードリレー	放電管・トランジスタ	磁気ドラム
〃　　〃	ECO	1958	放電管	トランジスタ	バリアグリッド管ほか
ベルギー　BTM	ME	1954	クロスバスイッチ	放電管・真空管	継電器
オランダ　フィリップス研究所	ETS	1960	半導体		
日本　電気通信研究所	α	1955	クロスバスイッチ	パラメトロン	パラメトロン

わが国においても、関連基礎技術の発展に鑑み、小規模ながら電子交換の研究が再開された。まず、大阪大学の喜田村善一により、全電子交換機を試作するため1949（昭和24）年ころより研究が開始された[5]。当初は、電子管を用いていたが、その後、トランジスタが利用できるようになり、1957（昭和32）年にトランジスタによる試作機を完成させた[6]。

一方、1951（昭和26）年2月電気通信研究所において準備的調査が開始され、1954（昭和29）年春から具体的な研究が始まった[7]。すなわち、1953（昭和28）年、後藤英一（当時、東京大学の大学院生）によりパラメトロンが発案[8]されるや、これをいち早く取り入れて、1955（昭和30）年にα交換機を組み立てた[9]。交換部品としてのパラメトロンの実用性を確認するためである。論理回路にパラメトロンが適用され、通話路にはクロスバスイッチが用いられた[註4]。1956（昭和31）年5月から8加入という小規模ながら研究所内で実用試験が実施された。パラメトロンの採用は、当時として信頼性、小形性、製作の容易さという点でこれまで適当な素子が見当らず苦しんでいたところ、これにより一応打破できたからである。これは、わが国における研究を活発化するきっかけを作り、製造会社、大学などにおいても続々と実験機が試作された（表5.2）[4]。上記のα交換機の後継として、規模を大きくしたβ交換機が試作され（図5.1）[10]、電電公社の社宅用として7年間にわたり運用実験が行われた。さらに全電子交換機の実験機が試作され、ω交換機と名付けられた[11]。

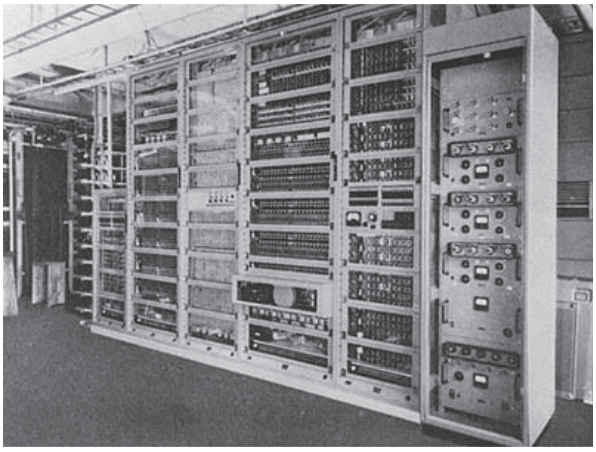


図5.1　パラメトロン制御電子交換機（β交換機）[10]

第二次世界大戦頃からの大きな技術革新に、電子計算機とトランジスタの発明がある。戦時中から米国陸軍の弾道計算に使用する目的で開発され、1946（昭和21）年に完成したENIAC-1号に始まる電子計算機の発展は、蓄積プログラム技術という革新的な思想をもたらした。また1948（昭和23）年ベル研究所で発明されたトランジスタに始まる半導体部品の進歩は、従来の電子管に基礎をおいた部品の概念を大きく変えてしまった。この2つの技術革新に最初に着目したのは米国ベル研究所である。1956（昭和31）年、ノーベル賞受賞者の一人ショックレー（William Shockley）の受賞講演[12]には、入社時（1936年）に上司より、「交換機の金属接点スイッチを電子的なものに変えて欲しい。」と説かれたとある。自由なテー

表5.2　空間分割電子交換機についての日本の試み[4]

開発機関	システム	発表	容量	通話路	制　御	稼働実積
電気通信研究所	β	1959	120	クロスバスイッチ	パラメトロン	社内小自動
大阪大学	阪大型	1957	100	半導体	トランジスタ	
岩崎通信機	DK-1	1959	10	〃	〃	
日本電気	NS-1B	1960	200	クロスバスイッチ	〃	三越PBX
〃	NS-2A	1961	60	〃	〃	四国電力PBX
〃	NS-3A	1963	1万	〃	部分SPC，トランジスタ	
〃	NEAX-1160	1966	4,000	フェリード	SPC，〃	
日立製作所	HITEX-3	1961	640	クロスバスイッチ	トランジスタ	東急PBX
沖電気工業	ACP-2203	1963	300	クロスバスイッチ	パラメトロン，トランジスタ	
沖電気工業	ACT-3306	1964	3,000	〃	SPC，トランジスタ	なごや科学館
富士通	OTQI-X1	1965	60	半導体	トランジスタ	観測船ふじ

註4　表5.1に当時の各国の状況を示したが、わが国においては、戦後ようやく立ち直り始めたばかりであり、4.3節で述べたようにクロスバ交換機の開発が緒についたばかりであった。その時点で、他国に引けを取らずに電子交換機を試作したことは特筆すべきである。

マについて研究できたが、いつも頭の中にその言葉があったとのことである。すなわち、トランジスタは、いわば交換機の革新という目的が契機となって発明されたといえよう。

米国ベル研究所では、1954（昭和 29）年に電子交換機に蓄積プログラム技術を導入することを決定した。その最初の試作機となったものが 1960 年にモリス局で現場試験に入った電子交換機 ECO（Electronic Central Office）である [13]。これが、目指すべき電子交換機のスタートと言ってよい。なお、トランジスタは制御部に使用され始めたが、まだ本格的なものではなかった。本節で、ここまで述べた交換機は、この ECO 以外は、すべて論理素子を布線（配線）にて回路化したものである。

5.2 電子交換技術の特徴

交換機の最も基本的な要素は、通話路の接続・切替えを行う通話路スイッチ網と、それを制御する制御部である。この制御部としていわば電子計算機を用いて、プログラムの指示に従って交換動作を行う方式が蓄積プログラム制御（Stored Program Control：以下 SPC と略す）である。蓄積プログラム制御方式の利点は、主に、次の点に要約される。

(1) 網構成の変更などに対して異なる交換動作が必要となっても、ハードウェアの変更なしにプログラムを変更するだけで対処できるので、融通性・可変性に富むこと、
(2) ハードウェアの規格統一が可能なこと、プログラムによる障害の自動識別や故障個所診断により保守性の向上を計れること、
(3) 新サービスやデータ交換・蓄積交換のような新しい高度な機能の導入が容易なこと。

本節では、この蓄積プログラム制御を実現する交換プログラムについて述べる。

交換プログラムの特色は、次の通りである。そのために、各種の工夫がなされている [14]。

(a) 非常に多くの端末機器（例えば数万個の電話機）を対象とする。さらに、同時に数千個にのぼる通話を、ほぼ実時間で処理する。
(b) 高い信頼性が要求される。そのため、障害が生じても、波及範囲を最小にしてシステムダウンを避けなければならない。（交換機の許容不稼動時間は 20 年間に 1 時間）
(c) 同一プログラムが、多数の局において長年にわたり使用される。

交換機を制御するプログラムとして呼処理、障害処理、運用管理、装置試験などがある。ここでは、呼処理、障害処理について説明する。

5.2.1 呼処理プログラム

まず、第 2 章で述べた電話交換の原理について考える。電話機と交換機の間での、発呼から終話までの信号のやりとりを図 5.2 に示す [15]。途中で、いろいろな事象、たとえば回線のビジーや相手の話中などのケースに遭遇する可能性があるが、基本的な流れを示したものである。なお、電話機（通信端末）と交換機間の制御信号を加入者線信号、交換機間の信号を局間信号という。

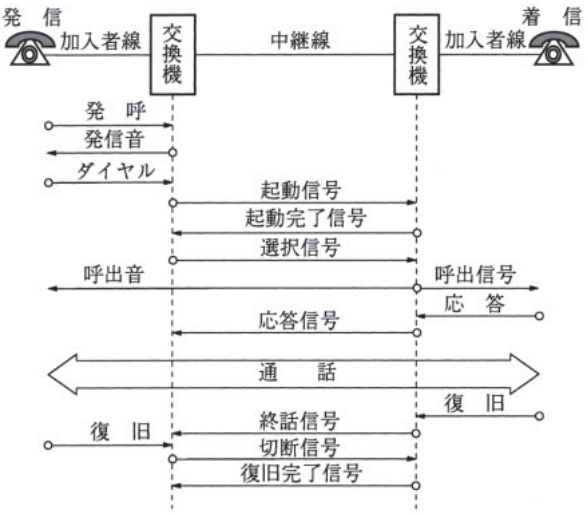


図 5.2 電話網における基本的な信号の流れ [15]

ここで、ある 1 つの呼の接続制御、すなわち呼処理動作の流れを抽出したものを図 5.3 に示す [16]。太線は加入者の動作や意志によるものであり、制御の時間に比較するとオーダの異なる大きいものである。処理と書いている箇所の始めと終わりに制御装置（プロセッサ）が働いている。すなわち、発呼、ダイヤルパルス到来、応答、終話などの状態変化時のみである。これらに対しては、加入者習性に依存する時間に比較するときわめて短い時間で処理できる。したがって、1 台のプロセッサで多重的に処理することが可能である。ダイヤル中、応答待ち、通話中といった時間帯は制御を必要としない安定状態であり、次の安定状態へ信号の入力、出力によって遷移することに着目して、呼処理動作を表示する状態遷移図記法が、わが国において考案された。基本的な考え方は、「交換動作は、信号待ちの状態（例えば被呼加入者呼出中）と信号入力（例えば被呼者応答）に反応して何らかの動作を行っ

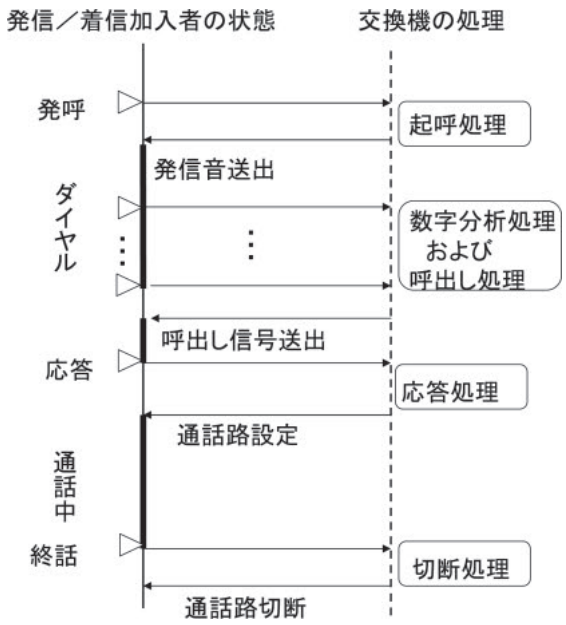


図 5.3　呼の進行状態
（太線は加入者の意志、動作に左右される時間帯）
（参考文献 [16] をもとに著者作成）

て次の状態（例えば通話中）に移る遷移との組合せから成る」ということである。そして、接続の状況を遷移図の中に書き込んだことに特長がある [17]。これは、電電公社・通研の川島浩らによって考案されたものである。その一例を、図 5.4 に示す。状態遷移図の導入は、プログラムを作る上で、次の点で非常に有効であった。すなわち、交換動作の仕様表現上、従来の説明的な文に頼るより明確になり誤解が減少した。また、状態を遷移させるタスクの設計作業が容易化された。これにより、電電公社と交換機製造メーカ 4 社（沖電気、日本電気、日立製作所、富士通）との共同開発の円滑な推進に大変有効であった [18]。また、国際的にもこの図法が利用された [19]。

この手法は、国際電信電話諮問委員会（CCITT：Comite Consultatif International Telegraphique et Telephonique）でも仕様記述の標準手法として採択され、国際的にその価値が認められた。なお、CCITT とは、電気通信に関する規格や技術の標準化などを行っている標準化機関の名称である。1956（昭和 31）年に国際連合により設立された。1993（平成 5）年には、ITU（国際電気通信連合）の下部組織として改組され、ITU-T（International Telecommunications Union-Telecommunication Standardization Sector）となった。

交換プログラムは、規模が大きくかつ長年にわたって保守をする必要があるので、その生産性、保守性、信頼性（潜在バグの少なさ）の向上が強く望まれていた。そのため、アセンブリ言語で記述するのではなく、高水準言語の適用が考えられ、CCITT において、専用の標準高水準プログラミング言語（CHILL：CCITT High Level Programming Language）が開発された。この開発には、上記の状態遷移図記法が有効に利用された。また、ここにおいても、わが国からの、丸山勝巳らによる貢献には極めて大きいものがあった [14), 19), 20)]。これは、5.3 節で述べる D10 形交換機の開発において、実際にコンパイラを開発しプログラミングをしながら CCITT に提案していったからである [21]。世界の交換機の歴史を書いた書物 [19] にも、紹介されている。

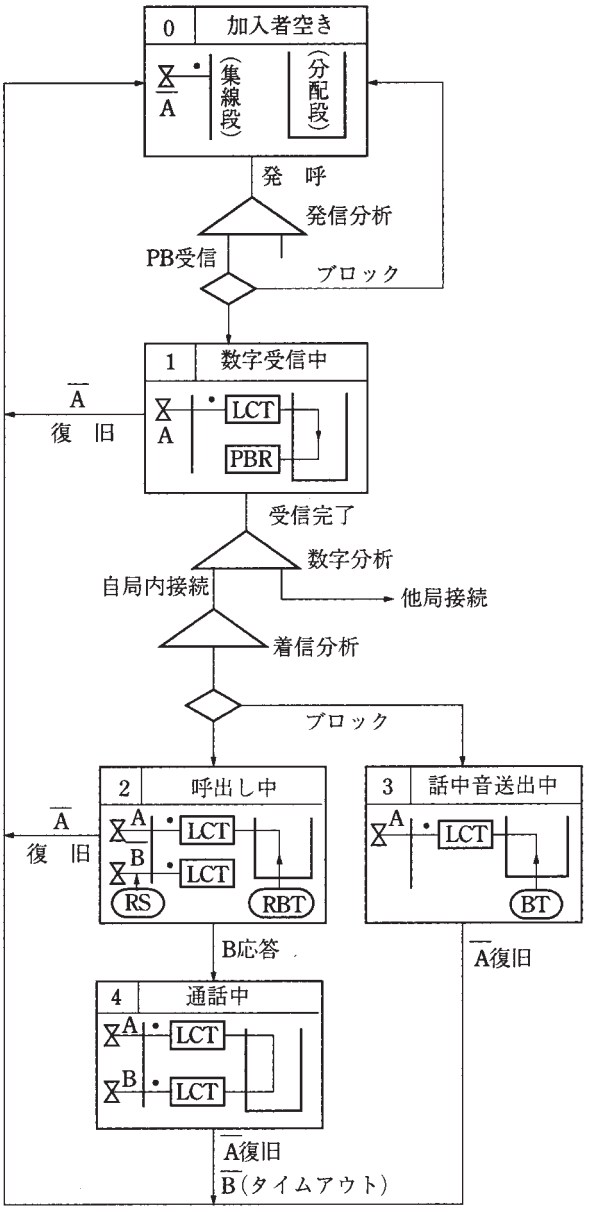


図 5.4　呼処理状態遷移図の一例 [15]

交換プログラムの構成概念図を、図 5.5 に示す[15]。入出力処理のプログラムは、優先度が高いので周期的にかつ割り込みで処理される。ひとつの周期内で B（Base）レベルの内部処理の実行が終了していない場合には、その処理に割り込むという意味である。割り込まれた処理はその次の周期で継続して処理される。周期的に実行されるプログラムは、タイムテーブルに登録されている。プログラムごとに、実行周期が決められているからである。すなわち、毎周期、2 周期ごと、…のようになっている。なお、呼処理よりも優先度の高い、障害処理プログラムについても、図の中に含めた。

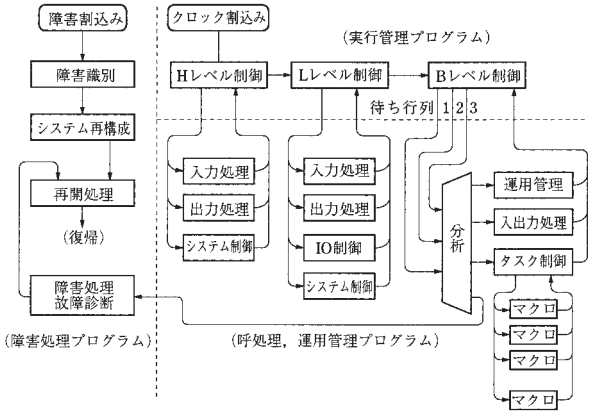


図 5.5　交換プログラムの構成概念図[15]

呼処理プログラムは、入力処理、内部処理、および出力処理の 3 つの部分から構成される（図 5.6）[16]。

(1) 入力処理

安定状態において状態変化を検出するための監視走査に関連する仕事である。たとえば、加入者からの要求信号を実時間で検出するために、4ms のクロック割込を利用し、優先度の高いレベルで実行される。

(2) 内部処理

入力処理で得られた要求内容を分析し、状態の遷移を行うタスクの選定、ルート選択、チャネル整合、接続制御のオーダ編集などを行う。これはプロセッサ内部だけで処理されることから内部処理と呼ばれている。

(3) 出力処理

出力処理は、内部処理で編集されたオーダをもとにして、実際のハードウェア（通話路、トランクなど）を制御して、メモリ上に作られた状態をハードウェア上に実現する、あるいは相手局に信号を送出する役目を持つ。これも 4ms のクロック割込を利用して、優先度の高いレベルで実行される。

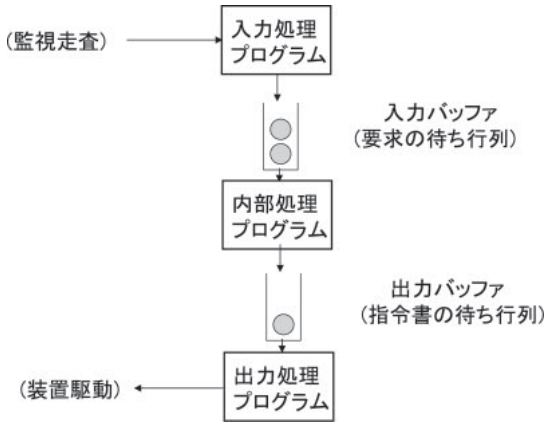


図 5.6　呼処理プログラムの構成
（参考文献[16] をもとに著者作成）

図 5.7 に、各優先レベルのプログラムの時間的な経過を示す[22]。一定周期のクロック割込みにより、優先度の高いプログラムが実行される。クロック割込みが起こると、まずその時刻に予定しておいた H（High）レベルのプログラムを実行する。それが終わると制御は L（Low）レベルに受け渡され、その時刻の予定プログラムを順次実行する。クロックレベルの仕事は入出力処理が多く、その結果として処理要求が待ち行列にたまってくる。クロックレベルの処理が終わると制御は B（Base）レベルに受け渡され、プロセッサは待ち行列に並んでいる処理要求を一つずつ取り出しながら内部処理を実行する。ベースレベルの処理は、さらに 3 つの優先度、BQ_1、BQ_2、BQ_3 に分かれている。また、ベースレベルの処理実行中にクロック割り込みが生じると、残りの処理は次の周期のベースレベルの最初に、中断点から再開処理される。このようにして、多重かつ、実時間の処理を実現している。なお、方式検討においては各優先レベルの実行待ち時間の見積もりが重要であるが、電電公社の村尾洋らにより近似式が理論的に導出された[23]。大規模なシミュレーションと比較して良好な精度を与えることが確認されている。

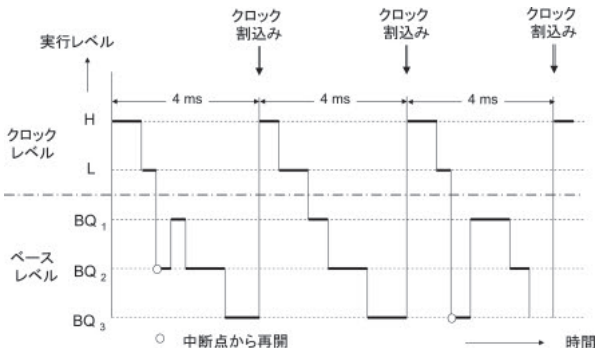


図 5.7　各レベルのプログラム実行方法
（参考文献[22] をもとに著者作成）

5.2.2　障害処理プログラム

電子交換機には、高い信頼性が要求される。そのため、故障が生じても、波及範囲を最小にしてシステムダウンを避けなければならない。ノンストップ運転の実現が課題である。そのため、障害処理プログラムが用意されている。これは、交換機とくに中央処理系の障害時に罹障（りしょう）装置を検出し、これを除外して健全な稼働系を再構築するソフトウェアである。すなわち、ハードウェアやソフトウェア障害に対し、サービスの連続性を保つため、共通装置に対して予備装置を置き、各種チェック機能とソフトウェアにより、障害装置を予備装置に切替えてサービスの継続を維持する。

ここで、予備装置の設置の仕方に、2重に置く2重化方式と、N台の制御装置に共通に1つの予備を置くN+1予備方式がある（図5.8）。コスト、信頼性の点から、いずれを選択するかが問われるが、電子交換機開発当初のハードウェアのコストは大きいものがあり、N+1予備方式の適用が検討され、積極的に使用された。ここでは、わが国で開発された、N+1予備方式において故障を検出し正常な系構成を選定する方式について述べる。

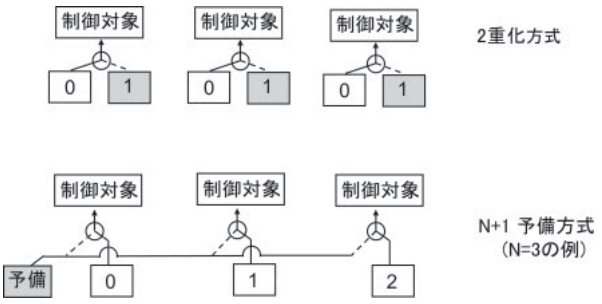


図5.8　予備装置の設置方式[24)]

図5.9は説明を簡単にするための、CC（中央制御装置）が1+1の2重化、メモリが3+1の予備方式の例である[24)]。これで取り得る組合わせは8通りある。この場合、メモリの量は、完全な2重化、すなわち2×3台に比べて6分の4になる。取り得るNの値は、通常はもう少し大きな値、例えば7くらいで構成できるので、必要なメモリが2重化方式に比べて半分くらいに減少する。これは装置コストだけでなく、設置するフロアの面積、消費電力などの低減にも有効である。ここで、N+1予備方式を採用した時、次に取り得る組合わせの中からどれを選べばよいかという課題が出てくる。

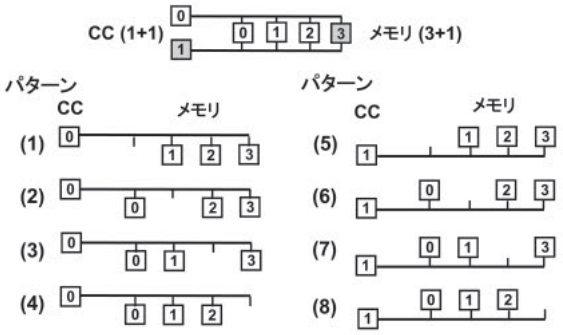


図5.9　N+1予備方式における組合せ[24)]

それに対して、循環切替方式（Rotation方式）が考案された。これは、システムに障害を検出すると、順次、新しい装置組合せの系で処理を再開するだけで、試験をして積極的に正常・異常を判断しようとしない点に特徴がある。図5.10に例を示す[24)]。取り得るパターンは表に示すように8通りある。ここでは、パターン⑤で運転中にメモリ3が故障した場合を想定する。パターンとして、表のように番号付けしてある。これにしたがい、⑤から順に切替えていく。この例では、メモリ3が故障したので、パターン⑧で落ち着くことになる。故障している装置を検出するのではなく、正常に動作する組み合わせを探索するところに特徴がある。ハードウェアの間欠的な故障と故障検出のタイミングにより、従来方式では、故障検出に失敗するという事例が生じた[25)]。そこで、単純に自動的に探索する方式が考案されたのである。ここで重要なのは、パターン番号をカウントする記憶である。このカウンタがエラーとならないように、外部記憶、すなわちソフトウェアでは書き直せない外部のハードウェアに記憶しておく。このシンプルな方式は、特許として登録された[26)]。

パターン

P	CC		メモリ			
	0	1	0	1	2	3
1	○			○	○	○
2	○		○		○	○
3	○		○	○		○
4	○		○	○	○	
5		○		○	○	⊗
6		○	○		○	○
7		○	○	○		○
8		○	○	○	○	

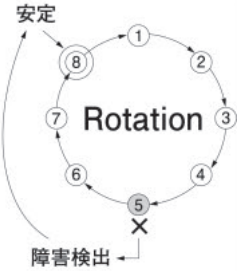


図5.10　循環切替動作[24)]

5.2.3　ハードウェア技術

電子交換方式DEX（Dendenkosha Electronic eXchange）の特徴は小型化を徹底したことである。架数の減少により架間ケーブルが減り、それをコネクタ接続にすれば設置工期を大幅に短縮できるという見込みによる。

通話路スイッチには、通研が開発した小型のクロスバ（XS）スイッチが導入された。スイッチ間の配線を架内に収めるため、電子回路と同じように小型スイッチ16個をグリッド板と称する鉄板に搭載し、これを並列に並べる高密度実装が実現された。また、環境汚染により雰囲気の影響で接点障害が生じたため、多接点封止型スイッチ（SMMスイッチ：Sealed Multi-contact Matrix Switch）が開発された。ただ、次章で述べるディジタル交換方式の出現までの技術であり、方式寿命としては大変短いものであった。

制御系には、最新のコンピュータで使用される技術が導入された。その一つは集積回路IC（Integrated Circuit）である。集積回路はテキサス・インスツルメンツ社のジャック・キルビー（Jack Kilby）と、フェアチャイルドセミコンダクターのロバート・ノイス（Robert Noyce）により、それぞれ独立に1959（昭和34）年頃に発明された。その後、小規模なものが軍事用あるいは航空宇宙用に生産されたが、最初の一般商用は、1964（昭和39）年発表のIBMのシステム360である。

二次記憶装置として、電話設備に磁気ドラムを利用することは、寿命、耐震性から議論があったが日本が最初に実施した。当時コンピュータで使用実績があったのは磁気ドラムであった。通研の研究者はヘッドを浮動化して大容量化（35Mbit）を実現し、かつ信頼性を高めた。その後、二次記憶装置には、磁気バブルメモリが採用された。

DEX方式のプロセッサはコンピュータと同様に、その後の電子技術の進歩を取り入れて随時改良された。記憶装置は大幅に小型経済化された半導体ICメモリ（4kbit MOSIC）の出現で、一時記憶に統一された。1978（昭和53）年にはゲート遅延2ns、200ゲートの論理MSIにより初期の商用機に比べ1/4の小型化と4倍の処理能力拡大（メモリサイクル0.3μs）を達成した。商用機の初導入時には、メモリサイクル時間は2.0μsであった。このように、要素技術の進歩は随時取り込まれた[13]。

5.2.4　共通線信号方式

通話（通信）の経路を確立するためには、発端末から着端末までの制御情報のやり取りが必要である。制御情報のことを信号というが、その信号方式は、第3章で述べたように、適用する区分に応じて2種類に分けられる。すなわち、端末と交換機間の信号方式を加入者線信号方式、交換機などのネットワーク内ノード間の信号方式を局間信号方式という。

局間信号方式については、今まで述べた、ステップバイステップ交換機やクロスバ交換機では、通話回線を用いて信号を転送する方式が用いられた。しかし、その方式では、通話中には信号を転送できない、また、信号の速度が遅く制限されてしまう、アナログ形式のためディジタル網への移行が難しい、等の制約があった。そこで、信号専用に回線を設けるという方法が考えだされた。信号回線を複数の通話が共通に使用するという意味で、共通線信号方式（Common Channel Signaling System）と呼ばれる。それに対し、上記の通話回線で信号を運ぶ方式を個別線信号方式という。それぞれの方式のイメージを、図5.11、図5.12に示す[27]。蓄積プログラム制御（SPC：Stored Program Control）技術を基本とする電子交換機が、ノードという点の高度化をもたらしたが、共通線信号方式は、それをネットワークという面に拡大したといえよう。共通線信号方式の基本構成を図5.13に示す[28]。信号網を介した信号送受信の制御は、交換機を制御するプロセッサが、信号装置を制御することによって行われる。なお、信号網に接続する各交換機のことを、信号端局（SEP：Signal End Point）と呼ぶ。

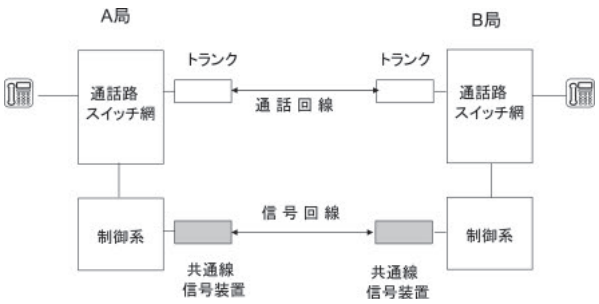


図5.11　共通線信号方式
（参考文献[27]をもとに著者作成）

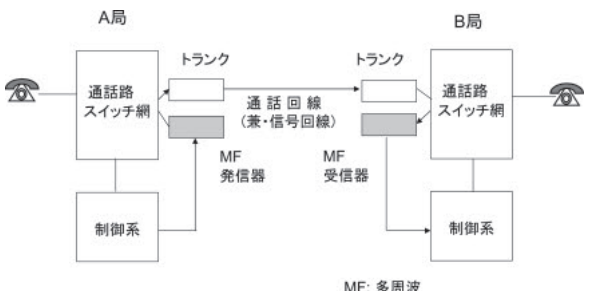


図5.12　個別線信号方式（MF信号の場合）
（参考文献[27]をもとに著者作成）

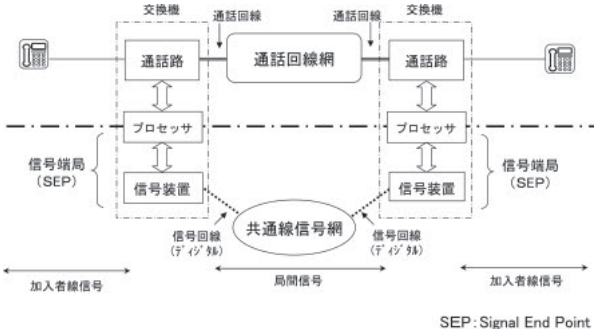


図 5.13　共通線信号方式の基本構成 [28)]

共通線信号方式自身は国際標準化の機関 CCITT において 1964（昭和 39）年に新課題・No.6 信号方式として研究されることが決まり、電電公社（現：NTT）は当初から極めて積極的に貢献した。1967（昭和 42）年に約一か月にわたって日本で開催された CCITT 関連会合の機会に、わが国の No.6 信号方式の実験が披露され、大きな反響を呼んだ[29)]。なお、No.6 は、CCITT において標準化された信号方式の順序番号である。（No.5 までは、個別線信号方式である。）1968 年に標準化されたが、わが国から大きな貢献があった。その一つとして、信号の遅延時間を評価する公式がある[30)]。これをもとに仕様書の一つの章を構成している[22), 31)]。この公式は、一般的な条件で導出されているので、No.6 方式の次に出てくる No.7 方式の方式検討にも利用された。

No.6 方式は、わが国では 1973（昭和 48）年に導入が開始された。しかし、信号長が固定（28bit）されていることや、信号速度（28kbit/sec）が遅い、さらには信号回線ルートと通話回線ルートとが同一である対応網構成[註 5]であるなど、拡張性や経済性に乏しかった。対応網構成とは、通話回線を設定する交換機の制御系装置の間で直接信号リンクを接続する網構成方式である[32)]。それは、No.6 方式が、もともとは国際間での適用を前提にしたためである。そのため、国内網には、上記のような欠点が出てきた。そこで、通信網のディジタル化やサービスの総合化を進めていくため、改良版の共通線信号方式（No.7）の検討が開始され、No.6 方式のわが国への商用導入は 1974（昭和 49）年までの 5 局にとどまった[27)]。なお、No.7 方式については、次章で述べる。

註 5　対応網構成では、制御信号と通話が同一ルートを流れるが、回線は分離されている。また、制御信号は同一の信号回線を共用する。個別線信号方式においても、制御信号と通話が同一ルートを流れるが、制御信号は通話回線に相乗りしている。この点が大きく異なる。

5.3　電子交換機の開発推移

電電公社・通研においては、5.1 節で述べたように、パラメトロンを論理素子として電子交換方式の研究が営々と進められていた。しかしながら、クロスバ交換機の開発・実用化により、全国自動即時化の目標に向って大きく進められている状況のもと、昭和 30 年代半ばには、電子交換方式の研究方向について、何らかの判断が必要な段階となっていた。そこで、1960（昭和 35）年末から約 1 年をかけて、「半電子交換方式の総合検討」が行われた。なお、交換機の電子化には通話路スイッチ網の電子化と、制御部の電子化とがあり、制御部のみ電子化したものを半電子交換方式（通話路スイッチは機械接点を有する機構部品）、両方電子化したものを全電子交換方式、と呼んでいた。

この検討には、当時米国で始められていた、システムズエンジニアリング（SE：Systems Engineering）の手法により、通話路スイッチ網（空間分割／時分割）、制御論理素子（パラメトロン／半導体）、制御方式（布線論理／蓄積プログラム制御）をパラメータとして、徹底的な SE が実施された。その結果、半電子交換方式に関して、主に次の結果が明らかにされた。

(1) 論理素子としては、半導体の方がパラメトロンよりも有利、
(2) クロスバ方式に比し、コスト面、大きさの面で半電子交換方式の方が勝る。

しかし既に量産体制に入っているクロスバ交換機には今後のコスト減が期待できること、全電子交換の見通しが従来よりも明るくなったことなどの諸点を考慮して、1962（昭和 37）年半ばには、次のように結論された。

(a) 半電子交換機の本格的開発に着手することは見合わせる、
(b) （全）電子交換機の完成を期し、より強力な体制の下に研究を強化する。

これにより、通研における半電子交換機及びパラメトロンの研究は終息した。

1953 年、通研は電子計算機の研究を開始したが、その試作に際し研究の重複を避けるため、電気試験所はトランジスタ式、通研はパラメトロン式と分担を決めている[4)]。1958（昭和 33）年にはパラメトロンを使った計算機 Musashino-1 号を完成していたが、その実用化を進める余裕がないため研究は中止された。電子交換機においても、上記のように、1962（昭和 37）年にパラメトロンを使った研究は終了したのである。パラメトロンが与えた効果は非常に大きなものがあったが、その適

用に対する研究期間が少々長すぎたため、半導体化への動きが遅れたと言えよう。パラメトロンを論理素子として使用した電子交換機開発の推進者であった喜安善市は、パラメトロンは速度が遅いほかに、誘導電流による誤動作、などの問題点があったと回想している[33]。

さて、このような判断が下された後、間もなく米国ベル研究所において、No.1 ESS（Electronic Switching System）およびNo.101 ESS（構内交換機用）に関するシンポジウムが、1963年1月に開催された。製造部門のWestern Electric社と特許契約のなかった通研はシンポジウムには参加しなかった。しかしながら、技術内容の詳細や商用化の具体計画が明らかとなるに従い、ようやくわが国でも、電子交換方式の実用化を急ぐべきであるとの気運が急速に高まった。なお、ベル研究所の紀要であるBSTJ（Bell System Technical Journal）は、電気通信関係者には極めて重要な情報源であったが、その1964年9月号には、No.1 ESS特集が組まれ、総ページ数は750ページを超えるものである。No.1 ESSは1965年5月に、ニュージャージ州のサカサナ（Succasunna）局でサービスを開始した。図5.14に、米国ベル研究所と電電公社の電子交換機の開発経過の比較を示す[34]。

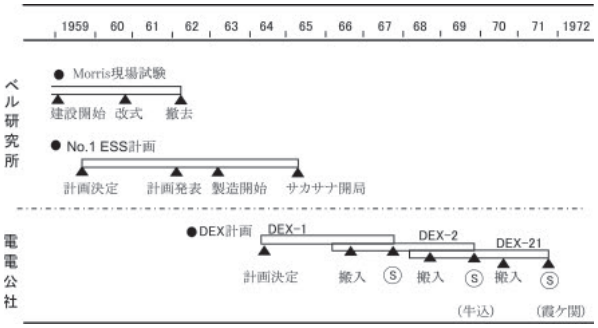


図5.14　米国・ベル研究所No.1 ESSと電電公社DEXの開発比較[34]

かくして、電子交換の研究計画に関して、1963（昭和38）年4月から再検討が開始された。その結論となった計画スケジュールは、次に示すものである。

(i) まず、室内実験を通じて、昭和41年度末までに空間分割形電子交換方式の問題点把握と時分割形通話路の技術的な見通しを明らかにする。

(ii) 上記結果により現場試験用の交換方式を定め、昭和45年度末までに試験を終え、昭和48年度より商用試験を実施することを一応の見通しとする。

また、電子交換機の略称として、DEXと命名された。これは、Dendenkosha Electronic eXchangeの略である。

その結果、1964（昭和39）年8月より電電公社は交換機関係4社（沖電気、日本電気、日立製作所、富士通）の協力を得て、実用化を目標とした本格的な研究体制のもとに電子交換方式の研究実用化を開始した[35]。まず、室内実験用として、空間分割形のDEX-1と時分割形のDEX-T1の2方式が並行して試作されることになった。

DEX-1は直ちに実用化することを意図したものではなく、蓄積プログラム制御（SPC：Stored Program Control）技術の基本的検討と電子交換機の信頼度設計および保守構想の検討など、基礎となる技術的問題の把握を急ぐための試作機である。この方式の設計検討には、ソフトウェアとハードウェアの機能分担と、初めての経験であるソフトウェアの構成方法および作成に多大の苦心が払われた。DEX-1は1965（昭和40）年12月に機器搬入後、プログラムによるデバッグ試験と安定化を図りつつ、1967（昭和42）年11月より1970（昭和45）年3月まで通研所内の電話機を収容して運用試験を行い所期の目的を果たした。

一方、時分割方式については、伝送路に対するPCM（Pulse Code Modulation、パルス符号変調）方式の採用に対応して、PCM交換を中心とした交換方式ならびにPCM伝送路を利用した遠隔制御による大局周辺の構成に関する検討を目的として、1967（昭和42）年、室内実験用交換機DEX-T1が開発された。

これらの室内実験機の試作結果・評価より、直ちに実用化する交換方式は蓄積プログラム制御の機械接点空間分割形に絞られた。時分割形交換機がはずされた理由は、加入者線交換機での経済性上の不利、中継交換機でも現状のPCM化率ではやはり経済性で不利、の2点にあった。なお、DEX-T1については、次章で詳しく述べる。

室内実験に続く現場試験機DEX-2の方式検討においては、従来の技術にとらわれることなく部品から方式まで独創的なアイデアを織込むことを方針として、可能性の限界に挑戦することとされた。設計の重点は小形化・経済化・処理能力の向上・安定動作におかれた。その成果として、処理能力はC400形クロスバ交換機とほぼ同等（約2.8万端子）であるが、装置の大きさを端的に表す架延長はその1/3-1/4というDEX-2交換機が開発された。DEX-2交換機は昭和43年度に2局分が製造され、通研と東京牛込局に設置された。牛込局は1969（昭和44）年12月にサービスを開始し、昭和47年2月に現場試験を終了した。

DEX-2方式の現場試験と並行して、同方式の商用方式の検討を目的とした定量的評価が進められた。そ

の結果、商用方式としては経済性・製造性・工事の容易化などについてなお一層の改善が必要なこと、また標準機種とするには用途と方式規模の拡大が必要なことが明らかにされた。このため再度、最終試作機DEX-21が開発されることになった。DEX-21方式は、1971（昭和46）年に研究所と東京霞ケ関局に設置され、後者は昭和46年12月10日電電公社本社の内線約2000を収容し、事業所集団電話機能を持つ市内交換機としてサービスを開始した。このようにして目標より2年も早く実用化を完了し得たわけであるが、この世界に類を見ない研究効率の良さは、ベル研究所の後に続いたことにもよるが、電電公社と関連製造会社、さらには関連部門間の緊密な協力体制と総合力の結集に成功したことにある。DEX-21方式を基本とした商用機はD10形なる名称のもとに、1972（昭和47）年6月東京の銀座（図5.15）[10]、大阪の船場両局で一般加入者へのサービスを開始した。D10形電子交換機（図5.16）は、2012（平成24）年国立科学博物館に重要科学技術史資料として登録された（第00105号）。このD10形電子交換機は若干のハードウェアとソフトウェアを変えることにより、市内（加入者線）・市外（中継）交換機いずれにも使用可能であった。

図5.15　D10形電子交換機の商用化（東京・銀座局）[10]

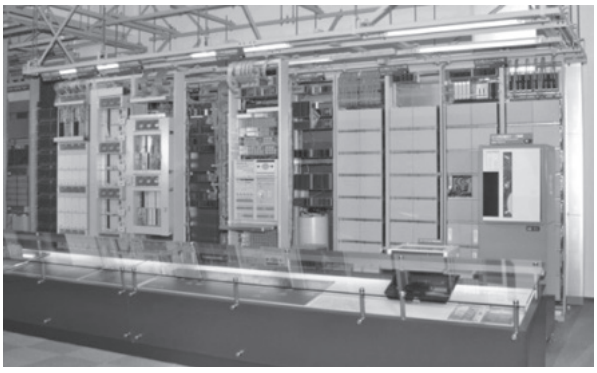


図5.16　D10形電子交換機（所蔵：NTT技術史料館）
重要科学技術史資料として登録

また、中規模の局に適用するためにD20形交換機が開発された。その開発過程は、上記のD10形交換機と同様に、室内実験、現場試験と進められ、1976（昭和51）年に軽井沢局に、商用機が始めて導入された。この交換機では、経済化のために使用頻度の少ない呼処理用プログラムを安価な二次メモリ（磁気ドラムなど）に置いておき、必要なたびにメインメモリ（一次記憶装置）に持ってくるというオーバレイ方式が開発された（図5.17）[36]。

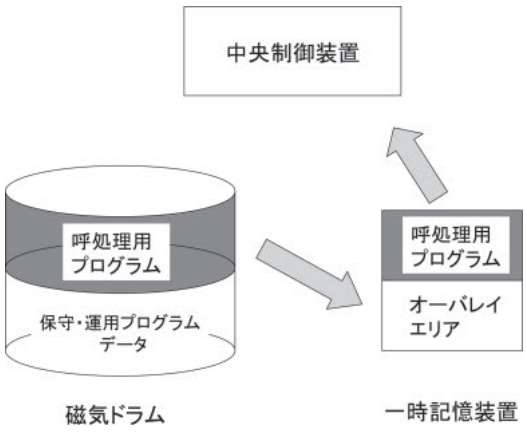


図5.17　D20のオーバレイ方式
（参考文献[36]をもとに著者作成）

さらに、小規模局用にD30も開発導入された[37]。D10、D20、D30形交換機の規模などを表5.3に示す[38]。なお、D10シリーズとしては、親局の制御装置によって、地理的に離れた場所にある複数の通話路を遠隔制御するD10-R1、-R3と呼ばれる機種も開発された。

表5.3　商用アナログ電子交換機の規模

	通話路容量	処理能力	稼動開始
大局用　D10	4,512 erl	130k BHCA	1971
中局用　D20	800 erl	30k BHCA	1976
小局用　D30	100 erl	3.6k BHCA	1980

erl：アーラン。同時接続数のこと

BHCA：Busy Hour Call Attempted
加えうる呼数/最繁時間

（参考文献[38]等より著者作成）

これらの（アナログ）電子交換機の導入により、交換機能の改変（ルーティング、課金方式、新サービスへの柔軟な対処など）が、主にソフトウェアの変更・

追加で容易に可能となった。また、自動車電話をはじめとする移動通信などは、電子交換の導入で初めて実現した。合計して約950ユニットが導入され（表5.4)、わが国の通信の高度化に極めて大きな貢献を果たした[39)]。しかしながら、1997（平成9）年12月17日に、次章で述べるディジタル交換機に完全にバトンタッチし、その役割を閉じた。商用機のサービスが始まってから、約25年である。

表5.4　DEX交換機の導入ユニット数[39)]

D-10 LS	約 570	導入のピーク	1984年
D-10 TS	約 140	〃	1985
D-20	約 100	〃	1984
D-30	約 140	〃	1986
計	約 950		

LS: 加入者線交換機(市内交換機)
TS: 中継線交換機(市外交換機)

商用としての導入後10年が経ち、電子交換機の運用実績が報告されている[40)]。それによると、20年に1時間という不稼動時間の目標は十分に達成されている。故障は年々減少し、代表的なクロスバ交換機C400の1/2以下と安定した状況で運用を続けた。

ベル研究所は改良したNo.1 A-ESSを1976（昭和51）年に導入したが、日本はそれと同等以上のDEX方式をその4年前に商用に移した。先頭ランナーにぴったりついて第4コーナで抜き去るという日本の技術開発の典型であり、以後米国はそれを可能にした共同研究を不公正競争の標的とするようになる[13)]。

参考文献

1）山内正弥，電子交換機の歩み，施設，vol.23, no.3，pp.10-16，1971.
2）梶井剛，通信機器の國産化に就て，電信電話学会雑誌，no.164，pp.829-834，1936.11.
3）山内正弥，電子交換機の実用化―大局用方式を中心に―，電子通信学会誌，vol.54，no.5，pp.664-682，1971.
4）城水元次郎，電気通信技術開発物語 電子交換編（その1)，電気通信，vol.57，no.575，pp.27-38，1994.
5）喜田村善一，電話交換技術と電話サービス，洛友会会報，no.88，pp.4-5，1974.
6）喜田村善一，電子交換機，生産と技術，vol.10, no.2，pp.41-47，1958.
7）喜安善市，電子交換について，電気通信学会誌，vol.41，no.2，pp.129-136，1958.
8）後藤英一，非線形共振子のパラメータ励振とその応用，電気通信学会誌，vol.38，no.10，pp.770-775，1955.
9）喜安善市 他，パラメトロンを用いた試作半電子交換機，電気通信学会誌，vol.42，no.3，pp.225-23，1959.
10）日本電気社史編纂室，日本電気株式会社百年史，日本電気株式会社，2001.
11）喜安善市 他，負抵抗素子を通話路スイッチとして用いた実験用全電子交換機，電気通信学会誌，vol.44，no.2，pp.197-205，1961.
12）W. Shockley, Transistor technology evokes new physics, Nobel Lecture, pp.344-374, December 11, 1956.
13）城水元次郎，電気通信物語―通信ネットワークを変えてきたもの，オーム社，2004.
14）丸山勝己，吉田靖之，交換プログラム用仕様記述法と高水準言語，情報処理，vol.21，no.3，pp.233-245，1980.
15）秋山稔，情報交換システム，丸善，1998.
16）秋山稔，五嶋一彦，島崎誠彦，ディジタル電話交換，産業図書，1986.
17）H. Kawashima, K. Futami and S. Kano, Functional specification of call processing by state transition diagram, IEEE Trans. on Communication Technology, vol.COM-19, no.5, pp.581-587, 1971.
18）河野善彌，近藤哲生，檜山邦夫，木村俊宏，陳慧，有限状態機械モデルに準拠した設計方式の改善，情報処理学会ソフトウェア工学研究会研究報告，vol.2010-SE-168，no.8，pp.1-8，2010.
19）R. J. Chapuis and A. E. Joel, Jr., Electronics, Computers, and Telephone Switching, North-Holland Publishing Company, 1990.
20）阿部正之，丸山勝己，電子交換機用高水準プログラミング言語，電子通信学会誌，vol.62，no.5，pp.508-510，1979.
21）丸山勝巳，2014年5月26日付私信.
22）藤木正也，電気通信研究所におけるトラヒックの研究，研究実用化報告，vol.30，no.8，pp.1921-1975，1981.
23）M. Fujiki and Y. Murao, Queueing model with regular service interruptions, Proc. 8th

International Teletraffic Congress, no.232, 1976.
24）石野福彌，通信ソフトウェアの研究実用化，研究実用化報告，vol.41，no.5，pp.547-590，1992.
25）日本電信電話公社技術局（編），電気通信自主技術開発史　交換編，電気通信協会，1976.
26）山田満慶，中村彰，石野福弥 他，循環緊急動作制御方式，特願昭45-67742（出願1970.08.04），特許788674号，登録1975.01.07.
27）保坂務，加納貞彦，共通線信号方式，電子通信学会誌，vol.64，no.5，pp.488-493，1981.
28）川島幸之助，宮保憲治，増田悦夫，最新コンピュータネットワーク技術の基礎，電気通信協会，2003.
29）葉原耕平，清野浩一，高橋達郎，電話交換システム，電子情報通信学会「知識ベース」，5群－4編－2章，電子情報通信学会，2010.
30）M. Fujiki, Queueing-delay formula for common-channel signaling systems, IEEE Trans. on Communications, vol.COM-20, no.4, pp.787-791, 1972.
31）CCITT, Specification of Signalling System, CCITT White Book, vol.6, pt.14, Oct. 1968
32）寺村浩一，保坂務，信号技術，電子通信学会誌，vol.61，no.4，pp.414-420，1978.
33）鵜飼直哉，宇田理，山田昭彦，オーラルヒストリー 喜安善市氏インタビュー，情報処理，vol.52，no.1，pp.114-120，2011.
34）城水元次郎，交換方式の実用化について，研究実用化報告，vol.29，no.3，pp.297-340，1980.
35）城水元次郎，電気通信技術開発物語 電子交換編（その2），電気通信，vol.57，no.576，pp.29-41，1994.
36）河野善弥 他，D20形電子交換機のハードウェア，日立評論，vol.58，no.7，pp.595-600，1976.
37）中村紀典，小局用電子交換機―D30―，電子通信学会誌，vol.64，no.6，pp.603-605，1981.
38）城水元次郎，わが国における電子交換の実績と課題，電子通信学会誌，vol.61，no.4，pp.341-348，1978.
39）城水元次郎，電気通信技術開発物語 電子交換編（その4），電気通信，vol.58，no.580，pp.27-41，1995.
40）角田忠久，後藤俊邦，電子交換機の運用実績と課題，電子通信学会誌，vol.66，no.5，pp.474-479，1983.

6 ディジタル電子交換機

電気通信の始まりは、モールスによる電信の発明（1837年）である。これは、ディジタル通信の最たるものと言える。その後、ベルによる電話の発明（1876年）により、アナログ情報の通信が長い間利用されてきた。その後、情報のディジタル符号化方式の基本となるPCM（Pulse Code Modulation）が、モールスの発明よりちょうど100年後の1937（昭和12）年に発明された。以来、電気通信のディジタル化は、素子の進展とともに進んできた。ディジタル化は、論理の容易な伝送から適用され、交換機にどのように適用していくかという研究開発が、着々と推進されてきた。

トランジスタの発明に始まる半導体の集積回路（IC：Integrated Circuit）化による経済性の向上、電子計算機のネットワークによる利用であるデータ通信の出現による需要の顕在化などを背景に、交換機内の通話路スイッチ網のディジタル化が進んだ。これにより、最終的に、送・受信端末間において、ディジタル信号の形で通信が可能となった。

6.1 その歴史

ディジタル通信において、その基となる最大の発明は、1937年の英国のリーブス（A. H. Reeves）によるパルス符号変調方式（PCM：Pulse Code Modulation）である[1)]。しかしながら、当時の素子では、PCM方式を経済的に実現することは困難であった。その特許に触発され、米国ベル研究所では、電話への応用が検討されていた[2) 註6]。

通信情報ディジタル化の基礎となる、もうひとつの大きな発明は、標本化定理である。これは、シャノン（C. E. Shannon）[4)]と、わが国の染谷勲によるものである。両者が、1949（昭和24）年にほぼ同時に発表している[5), 6)]。これにより、情報をどのような周波数で標本化（サンプリング）するかが、理論的に明確になった。これについては、6.2節で述べる。

第二次世界大戦後の電子技術の発展により、交換機制御系の電子化が進められるようになった。並行して、電子素子の高速性に着目し、通話路スイッチ網の時分割化の研究が盛んになった。これは、多数の通話者が時間的に通話路スイッチを共用することにより経済化、小形化を図るものである。

時分割交換方式としては、最初は変復調回路が簡単なパルス振幅変調（PAM:Pulse Amplitude Modulation）方式から研究が始まった。PAM方式は、音声のアナログ信号を周期的にサンプリングし、そのアナログ値（振幅）を送るものである。時間軸上では、離散的（ディジタル）ではあるが、厳密にはディジタル通信ではない。（これについては、6.2節で述べる。）このPAMによる交換方式の基本的な構想は1952（昭和27）年にイギリスにおいて初めて発表された。わが国では、東京大学の尾佐竹研究室において、当時大学院修士課程の学生であった秋山稔により、電子管等を使ったPAM交換機の研究が1955（昭和30）年頃から進められた。1958（昭和33）年3月には、30回線容量のわ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形交換機と命名された（Aは秋山稔、Oは指導教官の尾佐竹徇の頭文字）[7), 8), 9)]。なお、このAO-1交換機は、現在、芝浦工業大学に所蔵されている（図6.1）。

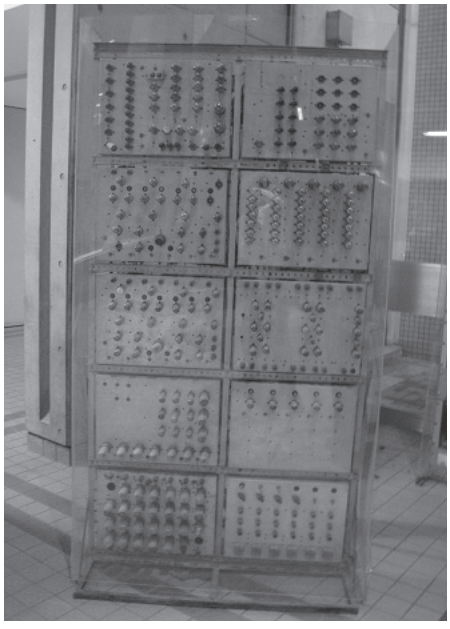


図6.1　AO-1形時分割多重電子交換機
（所蔵：芝浦工業大学）

註6　わが国においては、喜安善市が、当時勤務していた電気試験所でのミーティング（1941（昭和16）年頃）で、同一の原理を提案したと、回想している[3)]。しかしながら、何らかの発表まで至っていないのは残念なことである。当時もちろん、喜安は、リーブスの特許がフランスで出願されていたことは知らない。第二次大戦後の学術情報が少ないとき、GHQの図書館で、米国ベル研究所の紀要であるBSTJ（Bell System Technical Journal）に、PCMを電話に適用する論文を見つけ、その特許の存在を知った[3)]。なお、その論文は上記の文献2）と推察される。

電電公社・通研では1956（昭和31）年から電子制御交換方式、全電子交換方式の研究が開始されていたが、1959（昭和34）年に半導体部品を用いたPAM交換方式の研究が開始された。1960年からは、交換機製造会社4社（沖電気、日本電気、日立製作所、富士通）との共同研究が進められ、1962-63年には大局用としての性能を確認するための通話路装置の試作により総合評価がされた。PAM交換機は当時としては予想以上に小型化できることを実証し、製造会社からは構内用交換機として商用に提供されたものもあった（表6.1）[10]。しかしながら、これらを大容量化するには、PAM方式がパルス振幅の数値化においてアナログ方式であることから漏話や雑音など通話品質の点で問題があり、また、経済性でも既存の機械接点の通話路スイッチ方式には遠く及ばなかった。結局、研究開発の中心はPCM方式に移って行った。

PCM交換方式については、1959（昭和34）年に米国ベル研究所のボーン（H. E. Vaughan）をリーダとして、ESSEX（Experimental Solid State Exchange）と呼ぶ実験機が試作された[11]。この交換方式は、中継交換の際にディジタル信号をアナログ信号に変換することなく、そのままPCM信号の形で交換接続できることを大きな特徴とした。これによりいわゆるディジタル統合網（Integrated Digital Network）の構成を可能にした。しかし、このシステムは時分割ゲートを制御することによって交換する方式であり、同一タイムスロット間は交換できても、異なるタイムスロット間の交換ができず、交換網としては不完全なものであった。

異なるタイムスロット間を交換するための方法として、時間スイッチングの概念であるタイムスロット入れ替え方式が、1957（昭和32）年に東京大学・猪瀬博により発明された。猪瀬は、ESSEXの開発時、プロジェクトのコンサルタントとしてベル研究所に滞在していた[12]。この方法はメモリを用いることにより異なるタイムスロット間の交換を行うものである。1960（昭和35）年に米国特許として出願され、1965（昭和40）年に登録された。ただし、ベル研究所研究員との共同発明となった[13]。この概念は、その後のディジタル交換機の通話路スイッチ網の基本となり、ディジタル交換機の実用化を可能にした極めて大きな発明である。これについては、6.3節で述べる。

わが国では、東京大学・尾佐竹研究室が、PAM交換に続いてPCM交換の研究に着手し、並列PCM交換方式を提案した。この提案は、ESSEXのようにビット符号を時間的に直列に交換するのではなく、ビット符号を複数線上に並列化しそのまま並列交換する点に特徴がある[9), 14)]。これについては、6.3節で述べる。

電電公社においては、1966（昭和41）年にDEX-T1システムが試作され、これによりPCM交換機の実用性について技術的な見通しが得られるに至った。しかし、経済的には、当時の部品技術ではアナログ式の空間分割形交換機に比べ割高であることから、DEX-T1の実用化は見合され、開発リソースはアナログ電子交換機の実用化に集中された。DEX-T1については、6.4節で述べる。

表6.1　初期におけるPAM交換方式[10]

システム	会社・機関	通話路	制　御	規模	状　況（年）
BPO	BPO（英国）	ダイオード 真空管	放電管 ダイオード		1951　試作
EMAX	LMエリクソン	ダイオード	放電管		1956　試作
AO-1	東京大学	ダイオード 真空管	放電管 ダイオード	30	1956　試作
HITEX-3 TD	日立	半導体素子	半導体素子	30	1961　東京急行 電鉄PBX
FEAX-302A	富士通	半導体素子	半導体素子 磁歪遅延線	200	1961　松坂屋 PBX
ACT-1108	沖電気	半導体素子	半導体素子 磁歪遅延線	30	1964　名古屋市 科学館PBX

6.2 ディジタル通信の原理

人間が見聞きする音声や画像などは、アナログ信号である。これを、ディジタル化して処理、伝送することはメリットが多い。すなわち、ディジタル化すれば、情報は0, 1の値で表現されるので、伝送時の誤りが少ない、あるいは誤りの回復がしやすい。また、すべての情報が画一的に表現でき、コンピュータによる処理に適している。

アナログ信号のディジタル化には、各種の方式があるが、上述のPCM方式が最も一般的である。PCM化は標本化、量子化、符号化の3つの過程を経て行われる。PCMは、もともとは音声伝送用として開発されたので、それが前提となる。

(1) 標本化

電話用の音声信号は1回線（チャネル）当たりの信号帯域は約3.4kHzに制限されているため、染谷－シャノンの標本化定理により、8kHz以上で標本化（サンプリング）すれば、原信号を完全に再生できる。標本化定理は、1928年にナイキスト（Nyquist）[15]によって発見され、1949（昭和24）年にシャノン（Shannon）及び日本の染谷によって、まったく同一の式が独立に証明された[6]。染谷の述懐によれば、シャノンの論文に同一の式が掲載されていることを、発表から数年後に同僚の喜安善市に教えられたとのことである[5]。（なお、標本化定理に関してはシャノンや染谷以前に、多くの研究がある[註7]。）ここで、サンプリングによって得られた信号の形態はパルス振幅変調PAM（Pulse Amplitude Modulation）と呼ばれ、まだアナログ成分を含むパルス信号である。なお、サンプリング周波数として8kHzを使用した場合の周期は、時間では125 μsである（図6.2）[21]。

(2) 量子化

標本化された信号の大きさ、すなわちPAMの信号値は、連続的に変化するアナログ量であるため、これを離散的な数値に変換する操作が必要である。この操作を量子化という。通常のPCM方式では各標本に対応するパルス振幅を256のレベル（8ビットで表現）に区分し、パルスの振幅をこれに最も近い離散値で表現する。したがって、実際の振幅値と量子化された値との間には誤差が生じる。この誤差は量子化雑音と呼ばれ、ディジタル化に伴う品質劣化の要因となるが、音声などの人が判断するメディアでは気にならない程度である。

(3) 符号化

量子化された電話音声の標本値を8ビットの2進符号で表現することを符号化という。各標本値は8kHzごとに符号化されるため、電話1回線に対応する情報を送るために必要な伝送速度は、冗長度圧縮をしない場合には、8kHz×8（ビット）=64kb/sとなる。

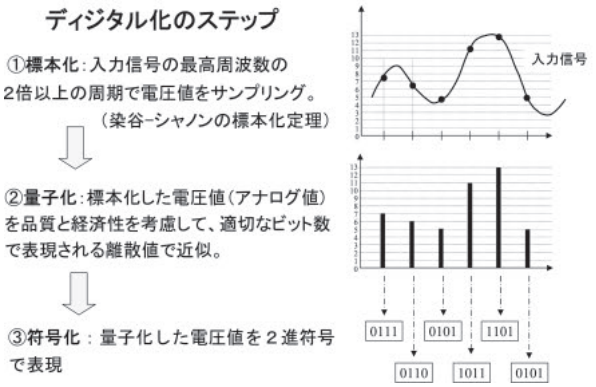


図6.2　アナログ信号のディジタル化[21]

このようにして、符号化された信号の流れを複数、同一の高速伝送回線で送る方法が時分割多重化である。時分割多重化の概念を図6.3（a）に示す[22]。図において、左側の各ポートに回線から信号が入力される。信号はいったんメモリに蓄えられ、一定周期で回転するロータリスイッチS_1により順次読み出され、高速の伝送路（ハイウェイと呼ばれる）に送り出される。これが時分割多重である。図では、例として、左側からビットが入力され、多重化されて流れている状況を示した。破線で囲んだビットが、ロータリスイッチの一回転で送信される。受信側では、ロータリスイッチS_2を、S_1と同一速度、同一位相（回転位置）で回転させ読み出す。それにより多重化された信号は回線ごとに分離され、右側の各ポートに出力されることになる。S_1とS_2は、同期していることが必要である。

註7　標本化定理は、シャノンや染谷による1949（昭和24）年の論文発表よりも以前から、多くの数学者による研究が発表されている。その中の一人として、わが国の小倉金之助による1915（大正4）年の発表もある[16]。その他、サーベイ論文が、数多く出されている[17),18),19)]。ただ、情報通信への応用を明確に意識しているのは、シャノンや染谷であり、そのため、標本化定理に彼らの名前が冠されている。なお、欧米では、単にシャノンの標本化定理と呼ばれる。それは、情報理論を独力で創設し、主要な理論をすべて確立した偉大な功績[20]によるのであろう。

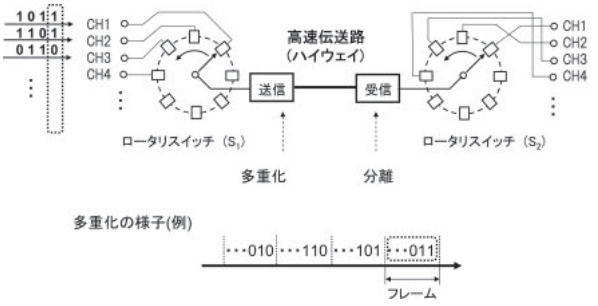


図 6.3（a） 時分割多重化の原理
（参考文献 [22] をもとに著者作成）

次に、実際の時分割多重の例として、PCM24 方式について述べる。この方式では、1 サンプリング周期を 24 分割し、各回線のサンプリング位置を 1/24 ずつずらして多重化する。各回線から来る信号をメモリに入れ、それをクロック（同期）信号をもとに読み出して、高速伝送回線に送出する。この各回線に割りつけられた時間位置をタイムスロットと呼び、多重化の 1 周期（1/8kHz＝125 μs）を 1 フレームと呼ぶ。電話回線 24 本分を多重化する伝送方式を PCM24 方式という。1 フレーム当りに多重化される音声信号の情報量は 24×8（ビット）＝192（ビット）であるが、各フレームの区切りを識別するためにフレームパルスがさらに 1 ビット加えられ、全体として 1 フレームは 193 ビットで構成されている。従って、PCM24 方式の多重化伝送速度は、193bit/125 μs＝1.544Mb/s となる（図 6.3（b）[21]）。

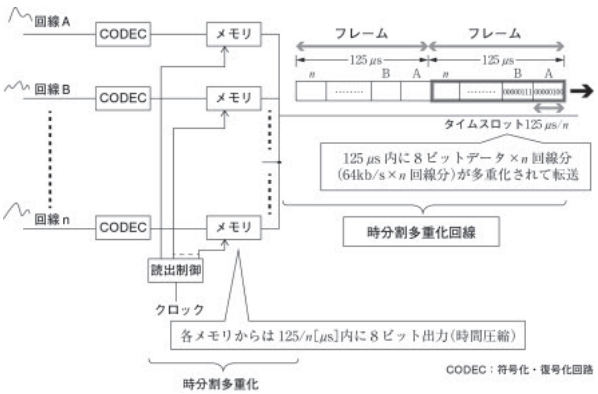


図 6.3（b） アナログ信号の PCM 多重化の過程 [21]

受信側では、先に説明したように送信側と逆の方法で多重分離を行う。すなわち、一度メモリにいれ、そこから低速の回線に、クロック（同期）信号をもとに読み出すことになる。さらに、最終的にはディジタル化されている信号をアナログ信号に戻す（逆変換する）ための操作が必要である。これを復号化という。

PCM 方式は、音声 1 チャネルに対して 64kb/s の速度を持つ信号のディジタル伝送が可能であるという点から、データ通信用の信号伝送用としても適用可能である。データ信号は、それ自体がディジタル信号であるため、PCM 方式との整合性は良い。

以上述べたように、ディジタル通信では、送・受信側で同期して処理することにより通信が成立している。したがって、同期を実現することが重要である。

わが国では、網同期の方式として従属同期方式を採用している [21]。すなわち、網内の特定の局を主局（マスター局）とし、これから発生する安定性の高いクロックを、クロック分配網を通じて他の局（従属局）に分配する。各局では、クロックを再生して主局周波数に同期化する（図 6.4）。

網同期の方式には、その他に独立同期方式 [24] と相互同期方式 [23] が考えられている。独立同期方式は、各局に非常に高い精度の発振器を独立に設置する方式であり、局の増設・改廃に柔軟性があるが発振器が高価であるという欠点がある。相互同期方式は、各局に設置された発振器を互いに他の局のクロックによって制御し、その相互作用によって網内の全局に共通する統一的な周波数を得る方式である。クロック分配路がループ状となり、故障切り分けが困難という欠点がある。

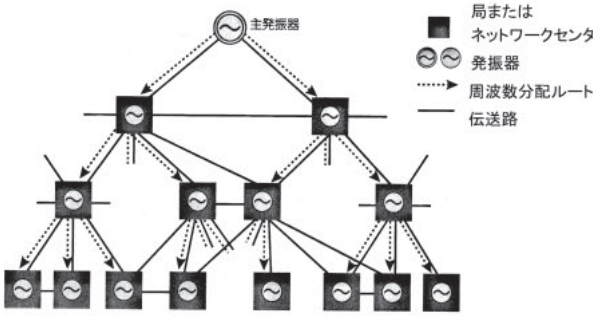


図 6.4 網同期技術（従属同期）[21]

従来のアナログ伝送方式では、伝送路上で混入された雑音は一旦重畳されると最後の受信端まで累積して伝送されるが、ディジタル伝送路ではディジタルパルスは再生中継されるため、あるレベル以下の雑音は中継器で除去することができ、受信端まで伝送されることはない。

6.3 ディジタル交換技術の特徴

6.1 節で述べたように、PCM 方式による最初のディジタル交換機はベル研究所が試作した ESSEX である。PCM 方式による時分割通話路スイッチでは、タイムスロット単位で接続される。ESSEX において

は、遠隔集線装置―通話路スイッチ網―遠隔集線装置、という接続構成がとられていた[11]。図 6.5 にそのイメージを示す。発着間で、同一のタイムスロットを探索し、マッチング（整合）がとれたタイムスロットで通信することになる[25), 26)]。方路の交換は、中央の時分割通話路スイッチで空間的に行われる。このディジタル交換では、あくまで同一のタイムスロットを使用するので、たとえ着側で他のタイムスロットに空きがあっても接続できないことになる。すなわち、通話路系での呼損率が悪くなることになる[註8]。ディジタル交換の研究初期では、伝送と交換のディジタル統合を実現することに注意が払われていたので、このような形態が定着していたと思われる[註9]。ESSEX プロジェクトが推進されているとき、猪瀬がベル研究所にコンサルタントとして滞在していた。猪瀬は、これでは通信網として融通性のある接続ができないことに気づき、いずれのタイムスロット間でも接続できる画期的な方法を考えついた。1957 年のことである。

それは、通話路スイッチでタイムスロットを入れ替える（乗り換える）というアイデアである[12), 29)]。図 6.6 の例[30)] では、仮に 1 フレームが 5 個のタイムスロットで構成されるとしている。交換機はタイムスロット 2 の信号 A をタイムスロット 5 に入れ替える。また、タイムスロット 4 の信号 B はタイムスロット 2 の信号に入れ替える。タイムスロットの入れ替えには遅延を使用する[31)]。この方式は、タイムスロット入れ替え方式（TSI：Time Slot Interchange）と呼ばれた。この発明により、交換と伝送をディジタル通信により統合する通信網が形成できることになる基本原理（「時間スイッチ」と呼ばれる）が出現した。この発明は、米国特許として、ベル研究所の研究員と共同で出願された[13)]。猪瀬の業績は、世界の交換機の歴史を書いた書物に、顔写真入りで 1 ページ以上にわたり紹介されている[32)]。

タイムスロット入れ替え方式は、特許を先に出願はしたものの、技術立証が残されていた。しかし、当時のベル研究所は、第 5 章で述べたように、蓄積プログラム制御のアナログ電子交換機 No.1 ESS の開発途上

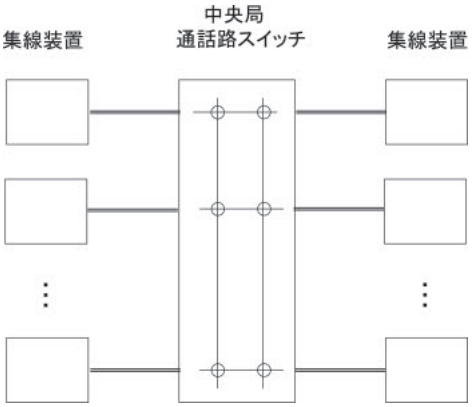


図 6.5　ディジタル交換のスイッチ（ESSEX）

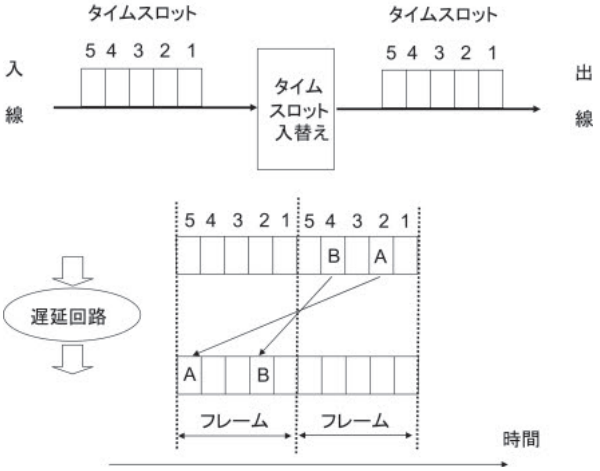


図 6.6　タイムスロット入れ替えの原理
（参考文献[30), 31)] をもとに著者作成）

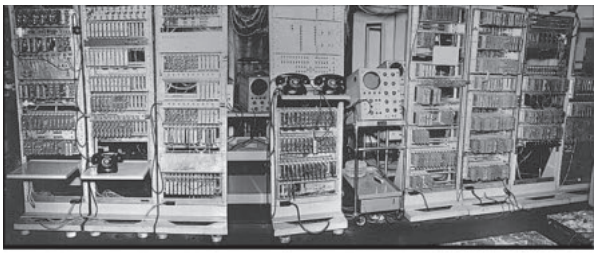
であり、総動員体制をとった。ボーン（Vaughan）以下の ESSEX 開発チームもこれに動員され、タイムスロット入れ替え方式の立証作業に要員が割けない状況であった。そのような状況の下、猪瀬は研究室挙げて実験機を試作した。それは、CAMPUS（Coded and Multiplexed Exchange Using Pulse Shift）と呼ばれた。その内容の一端は、研究開発に携わった河野による最近の研究会資料に紹介されている[33)]。この研究開発は、ベル研究所からの委託研究となり、当初は年間 5,000 ドル、後に年間 10,000 ドルの経費が出され、結局、それ以降の関連研究に対しても委託され、約 20 年間継続されたとのことである[31)]。

試作機 CAMPUS は、1962（昭和 37）年頃には動作可能となった（図 6.7）。ベル研究所から見学に来た ESSEX のプロジェクトリーダ Vaughan は、タイムスロット入れ替えの原理により実際に交換機が稼動している様子に驚嘆した。それ以降の、ベル研究所におけるディジタル交換機の開発に取り入れられたのはもちろんであるが、以後の各国におけるディジタル交換

註 8　なお、猪瀬は上記の方式での呼損率を近似理論的に求め、帰国後、論文化した[27)]。さらに、タイムスロット入れ替え方式を適用した場合の呼損率については、後ほど研究し論文化された[28)]。

註 9　米国・ベル研究所における科学技術の歴史をまとめた“A History of Engineering and Science in the Bell System”というシリーズがある。1980 年代に分野別に 7 巻発行された。その中で、ESSEX は「交換篇」ではなく、「通信篇」に記述されていることからも、推測される。

機を構成する基本原理となった。これは、交換機技術史において、世界に誇るべき快挙と言える。



Coded and Multiplexed Exchange Using Pulse Shift (CAMPUS)試作システム

図 6.7　タイムスロット入れ替え実証のために試作されたプロトタイプ [31)]

6.2 節で述べたように、電話音声を PCM 方式で符号化すると、音声の 1 チャネルは 8 ビットで表される。これをタイムスロットの単位として伝送する場合、時間的に直列に（順々に）送信してもよいが、伝送路を 8 本にして並列に伝送することもできる。前者の方式を直列 PCM、後者の方式を並列 PCM という。図 6.8 に、時間スイッチに対する、直列形と並列形の概念図を示す [22)]。

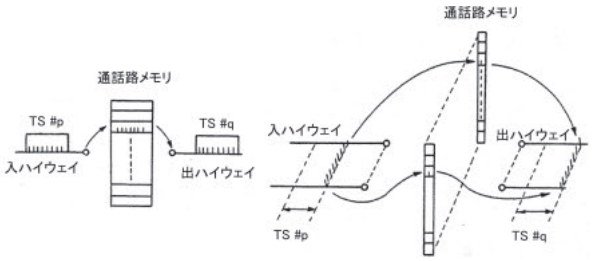


図 6.8　時間スイッチにおける直列形と並列形の概念図 [22)]

並列にすると、入り側と出側の伝送路の速度が等しい場合は、同一時間間隔で 8 倍のチャネル数を送ることができる。あるいは、出側の伝送速度を 1/8 にしても、同一のチャネル数を送ることができる。すなわち、時間スイッチの場合、速度の遅いメモリを使用してもよいという利点がある。並列化は時間スイッチに入る前段で行われ、並列のまま時間スイッチが行われる。また、空間スイッチの場合も、並列化したビットのまま、ゲートスイッチが行われる。

並列 PCM スイッチング方式は尾佐竹、秋山により考案された [14)] [註 10]。この方式はその後、世界中のディジタル交換機に採用された。6.6 節に述べる、わが国の商用ディジタル交換機である D60、D70 にも、もちろん使用されている。並列 PCM スイッチング方式は、1964（昭和 39）年 6 月に、特許第 316716 号となっている [34), 9)]。

猪瀬によるタイムスロット入れ替えの原理をもとにした通話路スイッチは、時間スイッチ（Time Switch：T と略記）と呼ばれる。これにより、時分割多重リンクであるハイウェイ間のタイムスロット不整合による不接続を回避できることになった。これに対し、従来のクロスバスイッチのように、入りと出回線の交点を開閉することにより接続を形成する通話路スイッチを、空間スイッチ（Space Switch：S と略記）という。交点がゲートとなるのでゲートスイッチとも呼ばれる。ディジタル交換では、ゲートには半導体素子が用いられる。T と S の 2 種類のスイッチユニットの組合せ方により、いろいろな形式の通話路スイッチ網が構成できる[註 11]。時間スイッチの主要構成素子はメモリであり、当初はそのコスト高のため、空間スイッチを多く利用する S-T-S 構成が多かった。しかし、LSI 技術の進歩によるメモリ価格の急速な低下により、T-S-T 構成など、ディジタル交換は時間スイッチ主体の時分割スイッチング方式へと移行した。最終的には T が 1 段の構成も現れた [38)]。

時間スイッチの具体的な構成について、例により説明する [39)]。図 6.9 に示すように、情報メモリと書き込み制御メモリから構成される。左の方から、タイムスロットが到着する。書き込み制御メモリには、入ってきた各タイムスロットに対応する制御情報が書かれている。図の例では、入り回線の第 1 タイムスロットを出回線の第 n タイムスロットに変換する（乗り換える）場合を示す。こ

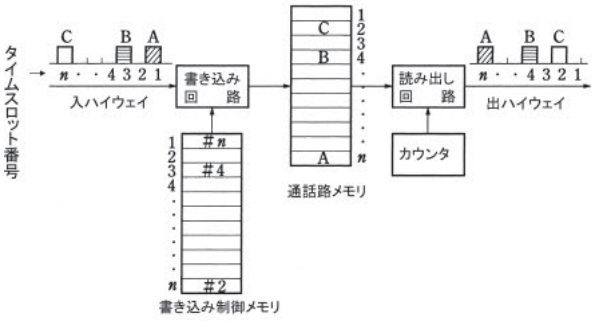


図 6.9　時間スイッチの構成例 [39)]

註 10　PCM の発明者である Reeves は、発明 25 周年の記念論文 [1)] で、日本の研究者、尾佐竹らによる並列 PCM の考え方は、本人の PCM の初期の特許（フランスでの出願）で示唆していたと記述している。これは、ある意味で、並列 PCM が優れていると言っているのであろう。

註 11　大規模な時分割通話路スイッチの研究は、東大の斉藤忠夫らにより行われ [35)]、1964（昭和 39）年に特許出願された [36)]。それはまた、米国特許にもなった [37)]。これは、米国ベル研究所の大容量市外交換機である No.4 ESS として、1975（昭和 50）年に実用化された。ディジタル交換機の流れを作った特許であるといえる。

の場合、書き込み制御メモリの第1タイムスロットのところに #n と書く。書き込み回路は到着したタイムスロットの情報を、書き込み制御メモリの指示に従って情報メモリに書き込む。例では、第1タイムスロットの情報 A は情報メモリの第 n タイムスロットに書き込まれる。読み出し回路は、カウンタに従い情報メモリの内容を順番に読み出し、送り出す。これにより、所望のタイムスロット変換ができたことになる。なお、制御メモリの設定は、通話経路の設定時に行われる。書き込みは順番に行い、読み出しの時に変換する方式も可能である。

次に、ディジタル交換の原理を簡単な例により説明する[39]。図 6.10 は中継交換の例である。2 本の入方路があり、それぞれ 3 チャネル（タイムスロット）の多重回線から成るものとする。出側にも 3 チャネル多重の 2 本の出方路がある。この通話路スイッチ網はハイウェイ上のタイムスロット（チャネル位相）の時間順序を入れ替える機能をもつ時間スイッチと、空間的にゲートを並べてハイウェイ相互間でチャネルごとの切換え接続を行う空間スイッチからできている。いま、入方路 1 から入った呼 A が出方路 1 の第 1 チャネルに接続されていたとする。次に入方路 2 の第 1 チャネルから入った呼 X も出方路 1 に接続するものとすると、出方路 1 の第 1 チャネルは既に使用中（ビジー）であるので、呼 X のチャネル順序を入れ替えなければならない。図では時間スイッチのタイムスロット変換回路でこれを第 2 チャネルに移した場合が示されている。時分割ゲート G_{21} を第 2 チャネル位相のパルス P_2 で開閉すれば呼 X は出方路 1 の第 2 チャネルに接続できることになる。他の呼の接続も全く同様である。このようにして、通信（通話）経路が形成される。

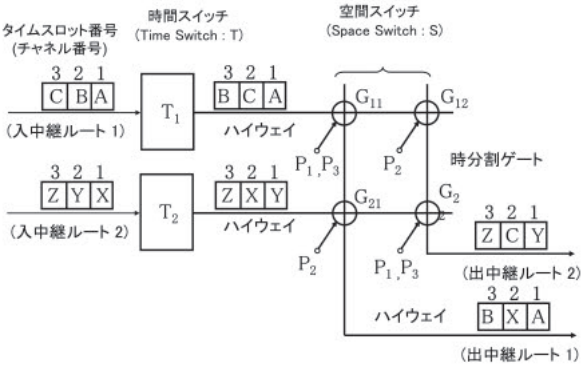


図 6.10　ディジタル交換の原理（例）[39]

6.4 ディジタル交換機の研究試作と評価

電電公社・通研においては、6.1 節で述べたように、昭和 30 年代の初めより電子交換機の研究が開始された。当初より、時分割方式についても、PAM 方式を中心に基礎研究が進められていた。一方、昭和 30 年代後半になると、PCM 方式が伝送分野に取り入れられつつあった。また、5.3 節で述べたように、蓄積プログラム制御の電子交換機を本格的に開発することが、1964（昭和 39）年に決定された。このとき、通話路スイッチ網として、クロスバスイッチを用いるアナログ電子交換機と、時分割スイッチを用いるディジタル交換機が並行して試作されることになった。本節では、ディジタル交換機の研究試作について述べる。

ディジタル交換機としては、すでに述べたように PCM 技術がディジタル化の本命であり、PCM 交換機が試作されることになった。その試作の目的は次の二つである[40]。

（a）PCM 交換機の技術的可能性と問題点の把握
（b）空間分割方式に対する経済性等から見た実用化見通しの明確化

上記の目的（a）については、ディジタル伝送方式である PCM24 方式が導入開始を迎えようという時期（実際には 1965（昭和 40）年末に導入開始）であり、それまでに PCM 技術により伝送と交換を統合した例はほとんどなく、未解決の要素がきわめて多かった。海外を見ても手本がないという状況であった。ベル研究所の ESSEX システムは、ディジタル統合網（Integrated Digital Network）という用語を初めて用いた実験機として知られているが、中央処理装置は最終的には完成されなかった。すでに述べたように、ベル研究所においてもアナログ電子交換機の開発に最大の重点をおいたからである。

上記の目的（b）については、アナログ電子交換機（DEX-1）との比較をするということであるが、そのため、ディジタル交換機にもトータルシステムとして試作することが要請された。その結果、DEX-T1 が試作されることになった。

通話路スイッチ技術のさらなる実証確認のため、「交 40 号 A」と呼ばれる通話路システムも並行して試作された。この装置では、並列 PCM 交換方式がとられた。DEX-T1 では、直列 PCM 交換を採用している。

6.4.1　DEX-T1 交換機の試作

DEX-T1 の設置形態を図 6.11 に示す[41]。図では、ディジタル交換機を中央局と称している。また、加入者の近辺に集線局を設け、PCM 伝送路を介して中央局から遠隔制御する形態が想定されている。実証するべき技術は、(1) 時分割通話路構成技術（遠隔制御技術を含む）、(2) 時分割通話路制御技術、(3) 網同期技術の 3 点である。それぞれについて述べる[42),43)]。

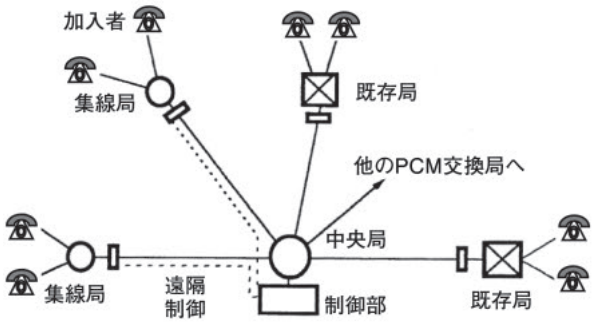


図 6.11　DEX-T1 方式の設置形態[41]

(1) 時分割通話路構成技術

方式構成の概要を図 6.12 に示す[44]。中央局の時分割通話路は、空間スイッチ（S）—時間スイッチ（T）—空間スイッチ（S）の 3 段構成が採られた。空間スイッチにダイオードゲート、時間スイッチに 1 ビット当たり 1 個の小容量コンデンサを用いたコンデンサメモリが使用された。これは、コンデンサに蓄えられたチャージの有無で情報を記憶するものである。当時の素子技術、コストから考えてこのように判断された。図 6.13 に、コンデンサメモリのボードを示す[10]。採用された通話路スイッチ構成は S-T-S であるが、前述のように各種の構成が考えられる。時分割通話路について、通話路網の構成法や内部輻輳（ブロック）率に関する広範な理論的研究が推進された[45),46)]。

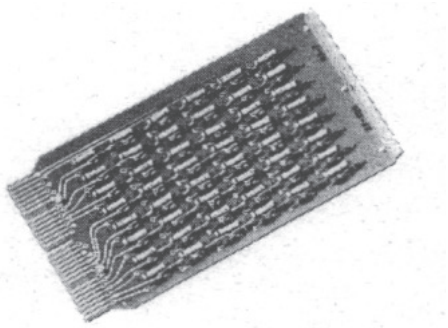


図 6.13　DEX-T1 のメモリボード(コンデンサメモリ)[10]
（8 ビット / チャネル× 6 チャネル / 片方向）

集線局の通話路スイッチには、ベルシステムでアナログ電子交換機に使用されているフェリードスイッチ（ガラス管にリードリレーを封入したスイッチ）が採

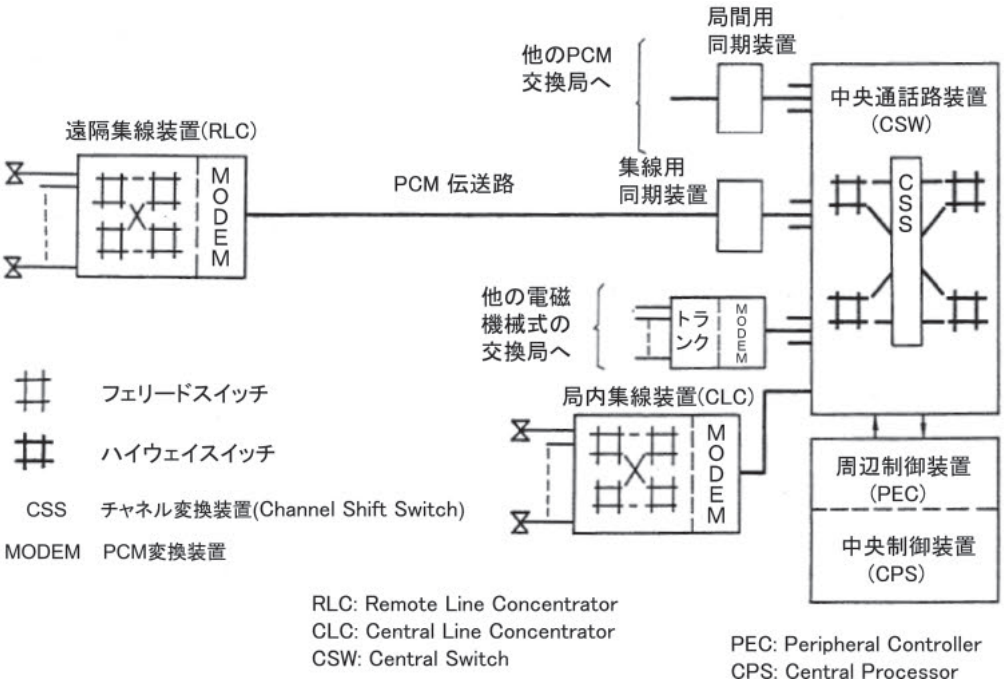


図 6.12　DEX-T1 の方式構成図[44]

用された。集線局はPCM24の伝送路で中央局と接続され、24チャネルのうち1チャネルを制御用として使用し、中央局から遠隔制御された。もともと音声用として考えられたPCM24に、ディジタルの制御信号を流して遠隔制御するという今までに例のない方式の確認であった。これは、5.3節で述べた遠隔制御のアナログ交換機、DEX-R1などや、次章で述べるISDNの基礎技術となった。

なお、中央局の通話路装置、集線装置の完成した写真をそれぞれ図6.14、図6.15に示す[47]。

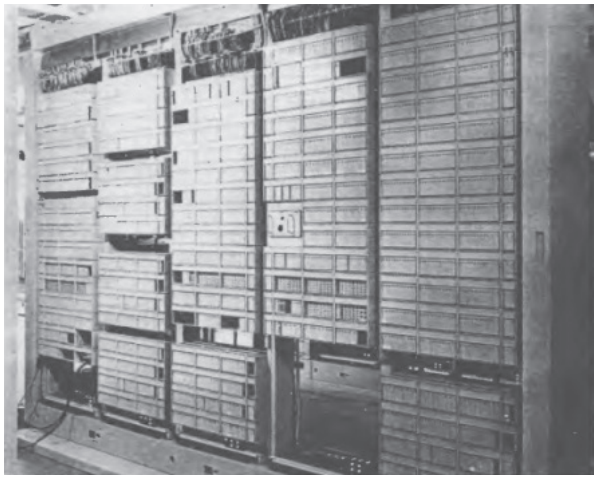


図6.14　DEX-T1　中央通話路装置[47]

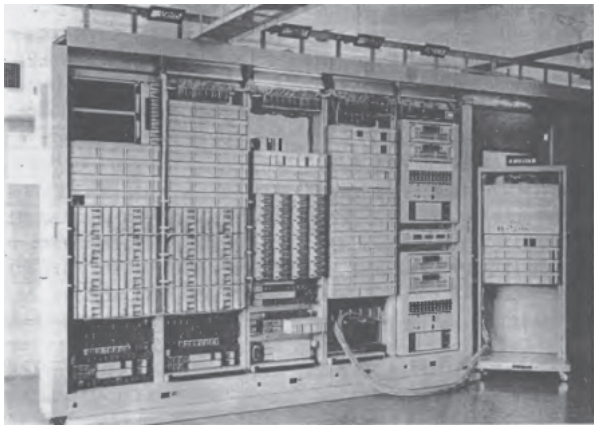


図6.15　DEX-T1　集線装置[47]

(2) 時分割通話路制御技術

並行して開発されているDEX-1では、専用の制御装置（いわば交換専用のコンピュータ）を開発していた。したがって、DEX-T1では制御装置の開発には時間をかけないで、日本電気製の汎用コンピュータが採用された。もちろん、各種命令を通話路制御用に変換することになった。

(3) 網同期技術

6.2節で述べたように、網同期技術はディジタル網の基本である。伝送と交換の統合は、時間が同期して初めて実現できる。当時の発振器の精度では独立同期方式は採れなかった。全交換局のクロック周波数を一致させる試みが世界的にも課題となっていた。これに対し、通研では「平衡相互同期」という方式が案出された[48]。これは各局がお互いに（複数の）他局と自局の周波数の上下関係を見ながら周波数をごくわずかに制御することにより同期系を構成するものであり、国際的にも高く評価された[49]。遠隔局通話路装置など、主従関係にある装置については中央局からのクロックに合わせる従属同期方式が用いられた。

6.4.2　交40号A交換機の試作

時分割通話路スイッチ技術の、さらに発展した方式の実現と確認のために試作された。すなわち、並列PCM交換方式[14]の採用が特徴である。ここでは、次の3点の可能性と特性の追求がもっとも大きい目的であった。すなわち、(1) 可変チャネルPCM変換装置、(2) 直並列チャネル変換装置、(3) 並列チャネル用のハイウェイスイッチ、である。これらの装置を含めた方式イメージを図6.16に示す[50]。

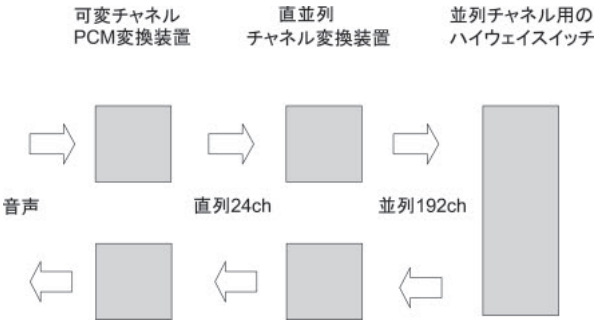


図6.16　交40号A交換機の方式イメージ

ここで、図に示した各装置について説明する。

(1) 可変チャネルPCM変換装置

PCM伝送方式で用いられている形式の変換装置では、音声側の回線番号とPCMの時分割チャネルの番号の対応が一義的に定まっている。そこで変換装置自身にスイッチングの機能をもたせ、音声回線とPCMチャネルの対応関係を任意に指定できる機能を付加している。これが可変チャネルPCM変換装置である。これにより、交換局内で任意の空き時分割チャネルが使用可能になる。

(2) 直並列チャネル変換装置

これは、直列24チャネル形式と並列192チャネル形式相互間の直並列変換を行ない、さらにチャネル相互間でチャネル変換を行なう機能（Tスイッチ）を果た

す装置である。並列 PCM 交換の要となるものである。

(3) 並列チャネル用のハイウェイスイッチ

これは、並列化したチャネルを対象とする時分割の空間スイッチである。

これらの技術検討により、広範囲の基礎データが集積された。ディジタル時分割交換機の試作が始まったばかりの頃に、まことに挑戦的な研究項目であったと言える。

6.4.3 ディジタル交換機試作の評価

総合的なシステム評価の結果、次のように結論された。すなわち、この試作によりディジタル交換の技術的可能性が確認された。とくに伝送品質上の問題はない。ただ、当時の部品レベルでは空間分割形の方式に比べて経済性、架延長ともに大きな差があり、電子部品の相当の進歩がなければ電話交換機として商用化できない。将来、電子部品が進歩し、その価格が飛躍的に安価になれば、ディジタル電話交換方式の実用化は可能である。具体的には、中継線交換機には 1/2〜1/3、加入者線交換機には 1/6〜1/10 に低廉化する必要がある。これは当時の予測では、当面は実現困難であった。ただし、データ交換などには十分適用の可能性があるとも記された。この評価をもって、試作機が完成したあとほどなく 1967（昭和 42）年に PCM 交換方式の研究は中止された[註12]。わが国ではこのような判断で PCM 交換の実用化への移行は中断されたが、その後しばらくして諸外国でも、それぞれの判断で開発を見あわせることになる（表 6.2）[10),51)]。

表 6.2 初期における PCM 交換方式 [10)]

国名	システム	製造会社	通話路	制御	規模	状況	(年)
イタリア	SINTEL-1	TELETTRA	S(R)S	WL	250	LAB・EXP	1966
日本	DEX-T1	NTT	STS	SPC	192	LAB・EXP	1967
英国	EMPRESS	BPO	STS	WL	192	FIELD・EXP	1968
英国	MOORGATE	STC	SSTSS	WL	384	FIELD・EXP	1971
フランス	E10	CIT	TT	AT	72K	SERVICE	1970
米国	No.4 ESS	WE	TSSSST	SPC	107K	SERVICE	1976
イタリア	SINTEL3	TELETTRA	SSTSS	SPC	144K	FIELD・EXP	1976
イタリア	PROTEO	SIT・CSELT	TST	SPC	163K	FIELD・EXP	1976
オランダ	PDX	PHILLIPS	TST	SPC	23K	FIELD・EXP	1976
西独	EWS-D	SIEMENS	TSST	SPC	63K	LAB・EXP	1976
スウェーデン	AXE	ERICSSON	TST	SPC	32K	FIELD・EXP	1976
米国	No.3 EAX	GTE-AE	SSTSS	SPC	60K	SERVICE	1978
米国	DMS200	NORTHERN	TSSSST	SPC	60K	FIELD・EXP	1977
英国	SYSTEM-X	4 COS	?	SPC	32K	LAB・EXP	1978
フランス	MT 20	トムソン-CSF	TSST	SPC	65K	SERVICE	1979
日本	NEAX81A	NEC	TSST	SPC	134K	LAB・EXP	1977
日本	NEAX-61	NEC	TSST	SPC	60K	SERVICE	1979
日本	HTX-TOLL	日立	SSTSS	SPC	60K	LAB・EXP	1978
日本	FETEX100	富士通	TSSSST	SPC	60K	LAB・EXP	1979

註 12 DEX-T1 の研究継続中止により、従事していた研究者は、アナログ電子交換機 DEX-2 をはじめ、いくつかのプロジェクトへとそれぞれ異動した。これにより、ある意味で技術的な波及が容易になったとも言える。また、ディジタル交換方式の特許についても、諸外国に対して恐れるものはなかったとのことである [40)]。

6.5 ディジタルデータ交換機の開発

オンラインシステムの出現により、昭和 40 年代になると、いわゆるデータ通信が少しずつ進展してきた。当初の利用は、一部の大型の専用システムに限られていたが、回線開放が行われると、電話網を利用したデータ通信が普及し始めた。すなわち、データ通信に対して新しい通信網への需要が見えてきた。

そのような中、電電公社では 1970（昭和 45）年初めに「総合通信網構想」を提唱し、1985（昭和 60）年頃の通信網のイメージを発表した。それが一つのきっかけとなり、時分割の DEX-T1 方式を受け継ぐ回線交換方式と、当時学界で提案されていたパケット交換方式が開発されることになった。

6.5.1 回線交換とパケット交換

回線交換とパケット交換について、概要を述べる。

(1) 回線交換

回線交換方式は、ディジタル形式で送られてきた情報を宛先方向の方路へ時分割交換するものである。回線交換機とディジタル伝送路で構成される回線交換網のイメージを図 6.17（a）に示す [52)]。送信端末からのデータ信号はディジタル形式のまま受信端末に送達される。送受信されるメッセージの形式やコードに関してネットワークは全く関与しない。回線交換機は、基本的にそれまでの交換機の流れにあり、とくにディジタル交換機として試作された DEX-T1 方式の技術の延長線上にあった。なお、回線交換は比較的長い電文やディジタルファクシミリ通信に適している。

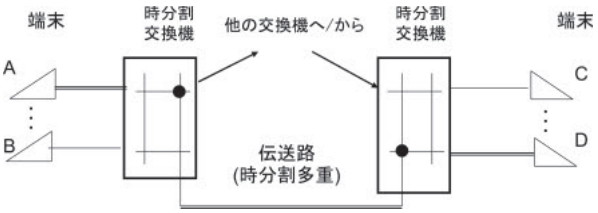


図 6.17（a） ディジタル回線交換の原理
（参考文献 [52)] 等をもとに著者作成）

(2) パケット交換

パケット交換方式は蓄積交換の一種である。端末からの通信文（メッセージ）をいったん蓄積し、「パケット」という、ある長さの情報に分解してパケットに付与された宛先方向へ送出する。網内はパケットの形式

で情報が流通する。パケット交換網のイメージを図6.17（b）に示す[21]。受信端末を収容する交換機において受信したパケットから通信文が組み立てられ、受信端末へ送られる。この方式では、パケットが伝送されているときのみ伝送路が使用されるので、ネットワークの効率的な利用が期待できる。ただし、回線交換と比較して、パケットを転送するたびに処理が必要である。パケット交換は、伝票のような短い電文の通信等に適している。

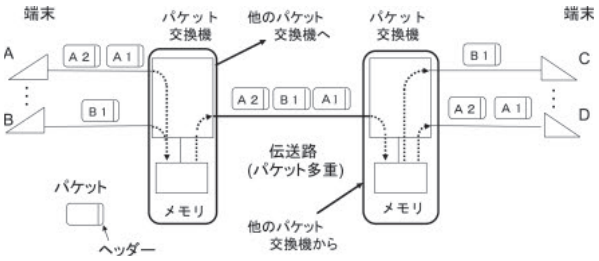


図6.17（b） パケット交換の原理
（参考文献[21]等をもとに著者作成）

この方式は、それまでの電話網とは全く異なる考え方により出てきたものである。米国RAND研究所のPaul Baranが、核攻撃に対して頑健な分散通信システムを蓄積交換の方式により構成する方法を1964（昭和39）年に提案した[53]。その後、英国のD. W. Daviesが、1967（昭和42）年に「パケット交換」と言う言葉を初めて用いた[54]。さらに米国国防省高等研究プロジェクト機構（ARPA：Advanced Research Project Agency）の支援で、これらの構想を実現するために、パケット送信の最初の実験が1969（昭和44）年に実施された。ところで、わが国において、Paul Baranの提案とほぼ同時期にパケット通信と同一の提案が行われた。大阪大学（当時）の長谷川利治らが国内で発表し[55]、さらに海外誌にも掲載された[56]。ただし、提案は、動的伝送システムというタイトル、かつ内容であり、交換方式やネットワークの研究者の関心を呼ばなかったものと推察される。引用されることはなかった。マルチメディアの伝送まで含まれているが、コンピュータの速度が遅い当時、その研究が顧みられることはなく、わが国において研究が継続されなかったのは残念である。

6.5.2 開発経緯

電電公社におけるディジタルデータ交換に関する研究開発は、1971（昭和46）年から、本格的に開始された。まず、DDX-1と称する室内実験機が開発され、現場試験機さらには所内試験機DDX-2の開発を経て、商用機D50が完成・導入された。（DDX：Dendenkosha Digital data eXchange）これらの研究開発の流れを図6.18に示す[52),57)]。

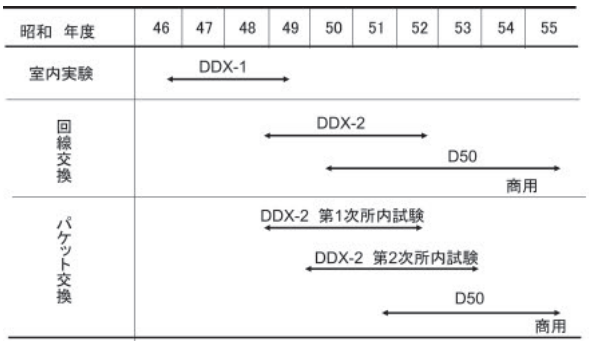


図6.18 ディジタルデータ交換機の研究開発の流れ（NTT）
（参考文献[52]をもとに著者作成）

（1）DDX-1（室内実験機）

データ交換方式には、上述のように原理的に異なる二つの方式がある。まず、室内実験として両方式の併合交換機が試作された。回線交換については、既に述べたディジタル交換の試作機DEX-T1方式の開発で培われた技術があった。しかし、パケット交換方式については、国際的にもまだ開発の端緒についたばかりで、まさに試作であった。とくに、網と端末のインタフェース、加入者線信号方式、多重化方式、同期方式などが研究課題であった。この試作により、各種の技術確認がなされたが、結果として、次の問題点が明確になった。

（a）回線・パケット交換併合方式は、プログラムが煩雑になる。また、パケット交換の特徴が出にくい。分離する方がよい。
（b）網と端末のインタフェースや加入者線信号方式では、国際標準を重視する。
（c）多重化方式では、PCM電話方式との親和性が重要である。すなわち、オクテット（8 bit）多重とする。

これらの教訓により、以後の試作が進められた。

（2）DDX-2 回線交換（現場試験機）

DDX-1の試作で得られた基本技術の成果を反映し、商用の原形となる現場試験機が開発された。現場試験では、現用の伝送路、加入者線を用いるとともに、現場試験機を現局に設置し、実用性を確認することが狙いである。とくに、信号方式については、国際標準がまだ流動的な課題に対してはDDX-1の経験が積極的

に標準化活動に反映された。また、計算機間通信の確認のため、東京大学と京都大学の計算機を収容し、相互の接続試験が実施された（図 6.19）[57), 58)]。これは、現在、国立情報学研究所（NII）が日本全国の大学、研究機関等の学術情報基盤として提供している学術情報ネットワーク（SINET：Science Information Network）の出発点と言える。

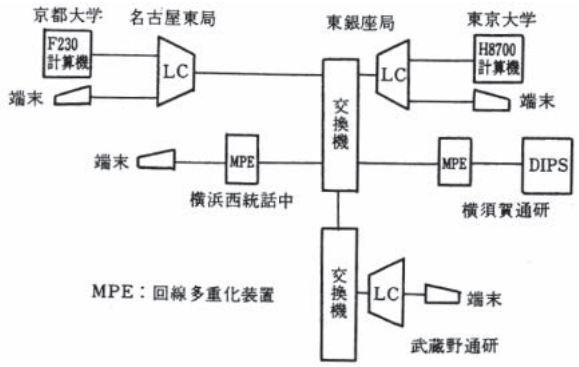


図 6.19　回線交換現場試験ネットワーク構成 [58)]

（3）DDX-2 パケット交換（所内試験機）

DDX-1 の試作で得られた成果をもとに、国際標準化への活動を行いながら、商用サービスに向けた試験が進められた。また、回線交換方式と比較して、技術的に未経験の課題が多く、現場試験ではなく所内試験機の開発という形がとられた。すなわち、計算機間通信機能を確認する第 1 段階と、既存の一般端末を含めた総合通信機能を確認する第 2 段階に分けて進められた。

主な技術と特徴を次に述べる。

（a）網アクセスプロトコル

パケット網に収容する端末はパケット多重インタフェースを有するパケット端末（PT：Packet mode Terminal）と既存の一般端末（NPT：Non-Packet mode Terminal）があるが、PT のプロトコルは国際標準 X.25 に準拠させた。ここで、頭文字の X は、CCITT（国際電信電話諮問委員会）で新データ網関係の勧告に付与されているものであり、X シリーズ勧告と言われる。その中で X.25 は、端末と網のインタフェースを規定する勧告であり、わが国から大変大きな寄与があった。すなわち、わが国をはじめ、米英仏加西蘭などの主要国では、すでにサービスを開始している国もあり、またコンピュータ製造の巨人・IBM もあり、X.25 の国際標準化は困難な過程であったが、1976（昭和 51）年の勧告にこぎつけた [59), 60)]。この中で、わが国からは、加藤満左夫、石野福彌を先頭に多数の関係者が標準化の推進に参画した[註 13]。なお、勧告は 4 年ごとに更新される。

（b）交換機構成および網構成

一般に低トラヒックの NPT を効率的にパケット交換網へ収容するために、パケット多重化装置（PMX：Packet Multiplexer）が導入された。この装置では、パケット組立・分解機能（PAD：Packet Assembly Disassembly）も持っている。システム構成を図 6.20 に示す [52)]。網構成については、各種網の比較検討を行い、初期は無階位、網規模拡大後は有階位の不完全メッシュ構成とされた [61)]。網構成の用語に関する記述については、第 2 章を参照されたい。

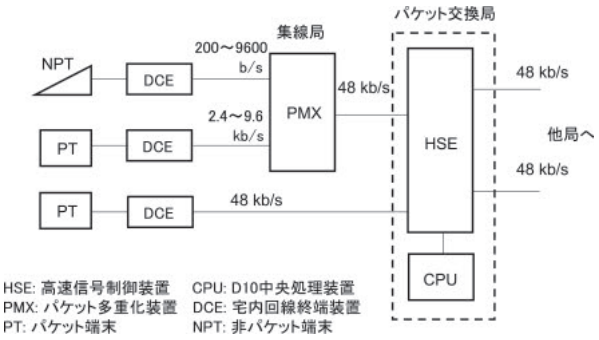


図 6.20　パケット交換のシステム構成
（参考文献 [52)] をもとに著者作成）

（c）サービス条件

呼制御として X.25 に準拠して呼ごとにリンクを設定・解除するバーチャルコール、及び加入時に設定するパーマネントバーチャルコールの両方が採用された。ここで、パーマネントバーチャルコールとは、いわば専用線である。ただし、物理的なリンクが設定されているわけではない。

註 13　パケット交換網では、次の（d）に述べるように、端末から過度のパケットの入力を調整するためにフロー制御（flow control）を行う。これは流量制御とも呼ばれる。いわば、高速道路で渋滞が発生しないように、入口規制することと似ている。そのために、パケットの出口側から入口側に向けてフィードバック信号が必要となる。その方法として、次の 2 方式に意見が分かれた。（方式 1）中継の交換機を介してリンクバイリンクに応答確認信号を送る、あるいは（方式 2）着信端末から送信端末に向けて直接確認信号を送る。方式 1 を採るとネットワークとして信号の送達のためにバッファを保留することになり、保留時間課金が必要となる。しかしながら、方式 2 では、送受の確認は端末間に任せられるので、保留時間ではなくパケット数課金でいけることになる。すでにパケット交換サービスを実施していたフランス、カナダは方式 1 を採用していた。大きな議論となったが、わが国からは方式 2 を主張し、最終的にその案が標準化された。これにより、電話網とは異なる課金方式のネットワークが生まれる基盤ができ、X.25 プロトコルが長い間使用されることになった。1976 年の勧告では、大筋が記述され、詳細化は 1980 年に勧告された。

（d）流量制御

高速端末と低速端末の通信時に、受信端末の能力以上のパケットを送信端末が網に送ると、網内のパケットバッファの輻輳が生じ、最終的には輻輳が全ネットワークに波及する。その防止のため、送信・受信のパケット数の整合を図るための制御が導入され、流量制御と呼ばれた。

（4）ディジタルデータ交換商用機

商用機の名称は、アナログ電子交換機からの継続で、回線交換、パケット交換、両方式とも D50 と命名された。

D50 回線交換機（D50-CS）は、DDX-2 現場試験機をプロトタイプとして、設計・製造が行われ、1979（昭和 54）年 12 月 25 日からサービスが開始された。交換機の写真を図 6.21（a）に示す。

D50 パケット交換機（D50-PS）は、DDX-2 所内試験機、特に第 2 次所内試験機をプロトタイプとして、設計・製造が行われ、1980（昭和 55）年 12 月 25 日からサービスが開始された。交換機の写真を図 6.21（b）に示す。

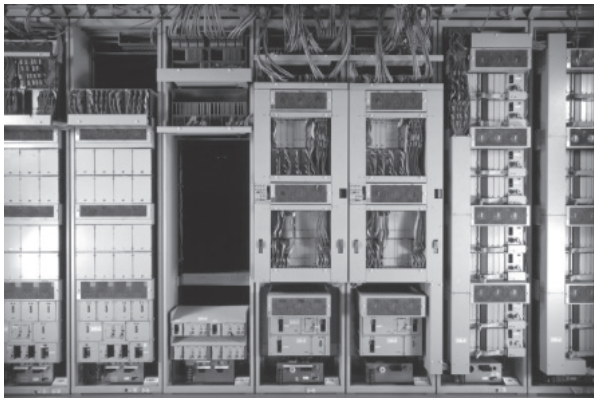


図 6.21（a） ディジタルデータ回線交換機　D50-CS
（NTT 技術史料館ホームページより）

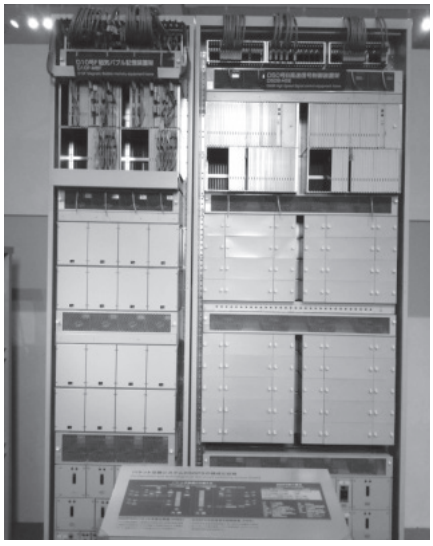


図 6.21（b） ディジタルデータパケット交換機
D50-PS（所蔵：NTT 技術史料館）

（5）大容量パケット交換機

上記の商用機 D50 に用いられた設備は、既存のハードウェアをできる限り採用することが基本方針とされた。初めてのサービスであるパケット交換では、端末の伝送速度、トラヒックなどの利用特性がまったく不明であり、ある仮定のもとで設計されるので、既存仕様の設備を利用するのは当然の流れといえる。その方針で、交換機の制御装置には、アナログ電子交換機 D10 のプロセッサが利用された。性能は、300 パケット／秒程度であった。

これでは、ますます増大してきたデータ通信の需要に対して応えることはできない。そこで、パケット処理能力を 1 万パケット／秒と、大幅に性能増加を図る大容量パケット交換機の研究がスタートした。大きな特徴は主に次の点である。

（a）マルチプロセッサ構成の採用により性能を向上させた。

（b）プロセッサ間の独立性を高め、信頼性を向上させた。パケット処理装置は、需要規模に応じてビルディングブロック方式で増設可能とされた。

（c）X.25 プロトコル制御を LSI 化した。

大容量パケット交換機は、D51 と命名された。システム構成を図 6.22 [59), 62)] に、交換機の写真を図 6.23 に示す。D51 交換機は、1 万パケット／秒を実現し、当時としては世界最高速のシステムであった。1985（昭和 60）年 12 月に計画どおりサービスが開始された。

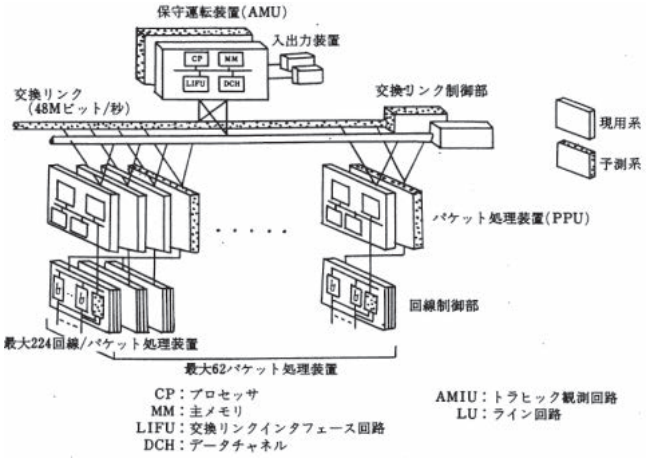


図 6.22　大容量パケット交換機（D51）のシステム構成 [59)]

図 6.23　大容量パケット交換機（D51）
（所蔵：NTT 技術史料館）

大容量パケット交換機の開発に際しては、商用になった交換機よりもさらに大容量の交換機の構成法が検討されていた[63]。すなわち、当時（1981 年）の素子技術でも 100 万パケット／秒の能力の交換機を、徹底した分散化により実現できることが示されている。さらにまた、音声通信にも適用可能であることを通信品質の観点でも定量的に示している。この時点で、ある意味で今日の姿まで見通していたことは特筆するべきことである。ただし、商用機の開発にリソースを集中するため、研究は継続されなかった。その他、ハードウェアがヘッダーを識別して交換する方式が考案されたが、それもまた商用交換機を目指していたので採用されなかった。その方式は、後にマルチメディアの通信方式として発明され、実用化された非同期転送モード（ATM：Asynchronous Transfer Mode）と同一の発想であった。これについては、国内特許が出願されたが[64]、フランスの特許が 2 カ月先行していたのは、残念なことであった。

なお、D50 回線交換機は、2003（平成 15）年にサービスを終了し、そのサービスは次章で述べる ISDN（INS）が継承した。D50 パケット交換機は 2010（平成 22）年にサービスを終了した。パケット交換サービスとしては、ISDN（INS）が継承している。

6.6　ディジタル電話交換機の開発

6.4 節で述べたように、ディジタル電話交換機に対しては、「将来、電子部品が進歩し、その価格が飛躍的に安価になれば、ディジタル電話交換方式の実用化は可能である。」という判断を下していた。1970 年代が進んでくると、半導体技術の大きな進歩により LSI の価格低下が現実のものとなってきた。あわせて、伝送路のディジタル化が進み、電話用ディジタル交換機の開発に乗り出す環境が熟してきた。

電電公社では、1973（昭和 48）年より電話用ディジタル交換方式の研究企画を立案するため検討が始まっていたが、1976（昭和 51）年 11 月に研究体制が強化され、1977 年に実用化がスタートした。

本節では、その開発経緯と技術について述べる。

6.6.1　開発経緯

一般にネットワークは、ノードとリンクにより構成される。通信網においては、ノードは交換システム（加入者線交換機、中継交換機）であり、リンクは伝送システム（加入者線伝送路、中継伝送路）である。このうち、ディジタル化は中継伝送路から開始された。交換機のディジタル化の議論が進められていた 1977（昭和 52）年には、わが国の中継伝送路の 25％までディジタル化が進んでいた。このような環境の下、次のような 3 段階で通信網のディジタル化を推進することとされた。

（ステップ 1）中継交換機のディジタル化（市外中継網のディジタル化）
（ステップ 2）加入者線交換機までのディジタル化
（ステップ 3）宅内機器までのディジタル化

通信網のディジタル化の進展過程を、図 6.24 に示す[21), 65)]。また、ディジタル交換方式の開発経過を、図 6.25 に示す[66)]。

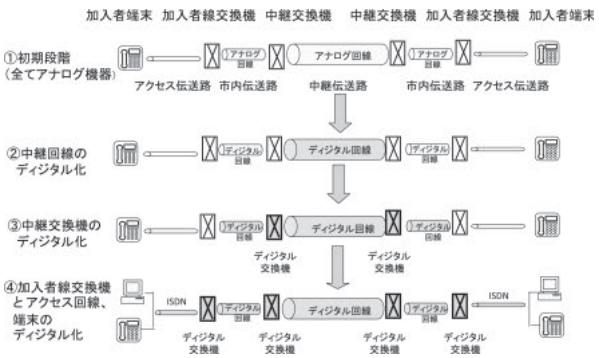


図 6.24　通信網ディジタル化の進展過程[21)]

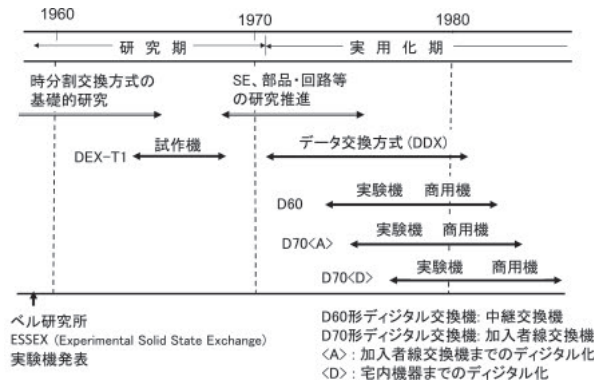


図 6.25　ディジタル交換方式の開発経過（NTT）
（参考文献[66)] をもとに著者作成）

ここで、特筆すべきことは、開発の当初よりISDN（Integrated Services Digital Network）を視野に入れていたことである。これは、国際標準機関CCITTにおいてISDNに関する各種技術の国際標準勧告が出された1988（昭和63）年11月よりはるかに早い時期であった。なお、ステップ3については、第7章で述べる。

6.6.2　中継交換機

まず、ステップ1として中継網ディジタル化の実用化が進められた。1976（昭和51）年には、長距離伝送方式に、同軸ケーブルのDC-400M方式（400Mb/s）の導入が始まり、全国網を対象にディジタル統合網への道を進むことになった。DC-400M方式は、当時世界最大の伝送容量をもち、PCM電話5,760回線に対応する。この動向を受けて、交換技術としては今までの新規技術の導入と同様に、電電公社・通研と交換機製造会社4社（沖電気、日本電気、日立製作所、富士通）との共同研究が、1977（昭和52）年12月から開始され実験機が試作された。その主な特徴は次のとおりである。

（1）時分割交換通話路

多重度4,000の大規模スイッチによる最大2万アーラン規模の時分割交換通話路の開発。その製造には、高速LSI、ECLメモリ（ECL：Emitter Coupled Logic；エミッタ結合ロジック）が用いられた。これは当時のアナログ電子交換機のD10に比べると5倍の容量で、中継網の経済化を狙ったものである。

（2）ディジタル信号装置

ディジタル化された局間信号をディジタル信号のまま処理できるようにした信号装置の開発。ディジタル統合の一環である。

（3）制御系

機能・負荷分散形のマルチプロセッサ処理方式の開発。1時間に最大64万呼を処理するための新しい技術が開発された。ビルディングブロック形式で、規模の大小に対応できる。

（4）共通線信号方式

国際標準であるCCITT No.7共通線信号方式の開発。CCITTにおける仕様決定に対し主導的な貢献がなされた。

中継交換機の試作機の完成により、1979（昭和54）年から1981年にかけて伝送端局も含めた現場試験が東京・唐ケ崎電話局において実施された。なお、網同期方式として弱結合従属同期方式が実用化された。これらの試作・現場試験・評価を通じて、ネットワークのコストを約20%経済化できる見通しが得られた。その結果、ディジタル中継交換機、及び同期系端局装置類の仕様が決定され、1982（昭和57）年から商用に供された。商用交換機は、D60形交換機と命名され、最初のD60は、東京・大手町局に導入された（図6.26）[67]。また、実機がNTT技術史料館に所蔵されている（図6.27）。なお、ディジタル化の進展や要素技術の発展を受け、改良機が開発された。改良D60あるいは改D60と呼ばれる。改良D60は1991（平成3）年から導入された[68),69)]。

図6.26　D60形ディジタル中継交換機（東京大手町局）[67]

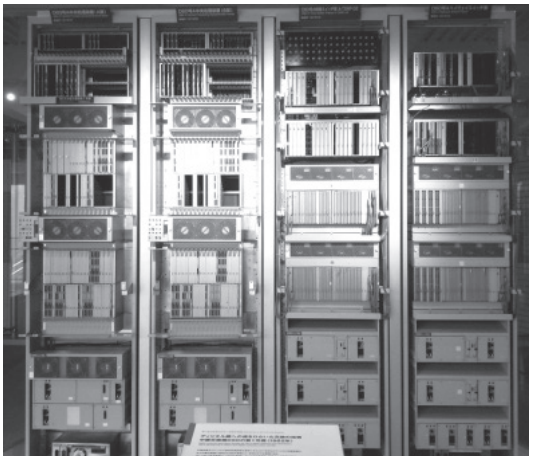


図6.27　D60形ディジタル中継交換機
（所蔵：NTT技術史料館）

ここで、No.7共通線信号方式（SS7：Signaling System No.7）について、特徴、検討経緯などを説明する。5.2.4項で述べたように、初めての共通線信号方式であるNo.6方式には、信号長が固定されているなど、各種の問題点があった。そこで、将来のISDNをも見通しながら、CCITTにおいて1973（昭和48）年より、No.7共通線信号方式の検討が開始された。そして、1980年10月に勧告が出された。その後、各国において本格導入された。現在も、本方式が利用されている。これはまた、公衆通信網の品質やセキュリティを確保するための大きな基盤となっている。

No.7 共通線信号方式の主な特徴は、以下の通りである[70),71)]。

(a) 信号の高速転送

4.8kb/s、48kb/s、64kb/s の信号専用のデータリンクにより、高速に信号を転送でき、接続遅延時間の短縮等、品質を向上することが可能である。

(b) 信号ユニットの可変長化

ユーザの違い、要求条件の変化に応じて各種の信号長が必要になると想定されるので、No.6 方式の固定長ではなく、可変長としている。これにより、フラグ同期を採用している。

(c) 信号端局間の信号経路の設置方式に準対応モードの設定

No.6 方式では、対応モードとしていたが、No.7 方式では準対応モードの設定も可能とした[註14]。これにより、信号網が通話網とはほぼ独立して構成できるようになり、経済性が向上した。図 6.28 参照[21)]。

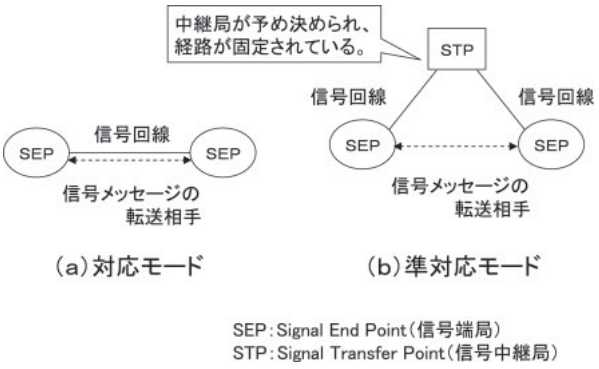


図 6.28　対応モードと準対応モード[21)]

No.7 共通線信号方式においては、1 本の信号回線で多数の通話回線に対応する信号を運ぶ。したがって、信号回線故障の影響は大きいので、信号網には高い信頼性が要求される。このため、図 6.29 に示す[21)]ような、信号網全体を A 面と B 面とに二重化した冗長構成を採用している。これは、信号網の二面構成と呼ばれている。各 SEP（信号端局）は、両方の面の網に帰属し、信号トラヒックは、通常運用時には両方の面に半分ずつ均等に分散された形で転送される。一方の網に故障が発生した場合には、他方で全部のトラヒックを処理できるように設計されている。

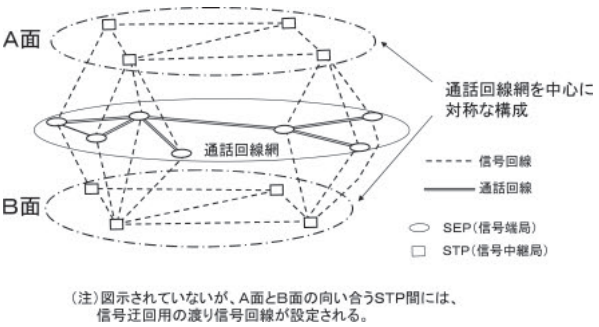


図 6.29　共通線信号網の冗長構成例[21)]

信号方式の規定に対しては、当然ながら国際標準化が必須である。No.7 方式の標準化の検討においては、当初、信号長を固定長とする案が前提となって進んでいた。しかしながら、電電公社からの委員であった加納貞彦は、将来への発展性を考えると、可変長とするのがベストであると確信を持ち、各国の代表を説得し、可変長へと持って行った。これにより、その後の各種ネットワークへの適用が可能となり、ネットワークの進展を促すとともに、今もなお利用されているきわめて息の長い方式になったといえる[72)]。

6.6.3　加入者線交換機

電話網ディジタル化の第 2 ステップでは、加入者線交換機のディジタル化が進められた。実験機の開発を経て商用化に移ることになるが、商用化された加入者線交換機は、D70 形交換機と称された。図 6.30 に、D60 と D70 の方式構成のブロック図を示す[66),73)]。図の中央に通話路装置を配しているが、その左側が加入者線交換機に必要な機能・装置である。

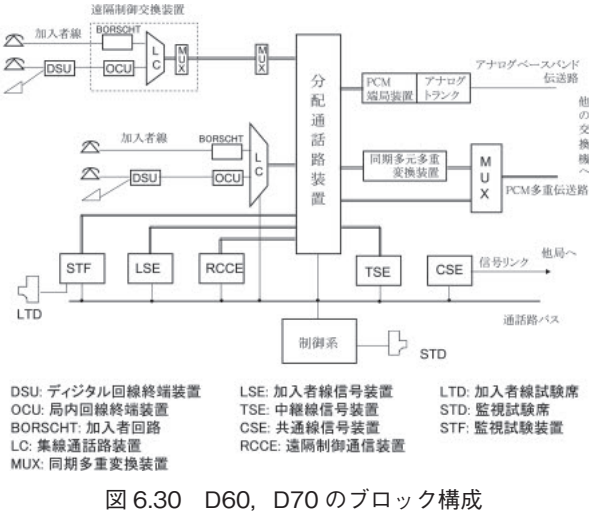


図 6.30　D60，D70 のブロック構成
（参考文献[66),73)]をもとに著者作成）

註 14　対応モードとは、図 6.28 に示すように、信号端局（SEP）間を直結する信号回線を共通に使用する構成である。それに対し、起点の交換機から終点の交換機まで、信号中継局（STP）で構成される信号専用の信号網を構成する方式を非対応モードという。その中で、使用する信号中継局が事前に決定されている方式を準対応モードという。信号専用の信号網を形成するのは、信号トラヒックが少ないので独自にネットワークを作る方が経済的になるからである。

加入者線交換機の開発では、集線系ならびに加入者回路をいかに構成するかが大きな課題であった。また、小規模の需要エリアに対しては、DEX-T1 で確認した遠隔制御が導入された。

(1) 加入者回路

アナログ交換機の場合には、通話電流の供給、呼出信号送出などの電話機制御や、加入者線試験は、集線して高能率に使用する形態が可能であった。しかし、ディジタル交換機では電子スイッチを用いるので、大電力信号を通話路を通して高能率で扱うことは困難であり、加入者ごとの設置が必要となった。さらにディジタル化に伴う機能として、符号・復号化機能や、過大電圧に対処するための防御機能も必要である。それらの機能は、下記に示す項目である[74]。

Battery feed：電話機への通話電流供給
Overvoltage protection：雷などの高電圧防御
Ringing：電話機ベルへの呼出電流供給
Supervision：加入者オン・オフ状態の監視
Coding/Decoding：音声のアナログ－ディジタル相互変換
Hybrid：2 線・4 線変換
Test：加入者線の試験

上記機能の頭文字を連ねて、BORSCHT 機能と呼ばれた。これを加入者回路で提供するが、その数（加入者数）が多いので LSI 化が適している。コスト、実装の容積の点から、いかに LSI 化するかが大きな課題であった。商用開始当初は 4 チップから構成されていたが、LSI プロセス技術の高精細化により、1988（昭和 63）年には 2 チップ化のものが導入できた[75]。

(2) 通話路装置

D70 の方式的な特徴は、容量（規模）と機能に関してブロック化を徹底し、小局から大局までの広い適用領域を持つ 1 系列設計としていることである。ビルディングブロックの概念図を、図 6.31 に示す[22]。

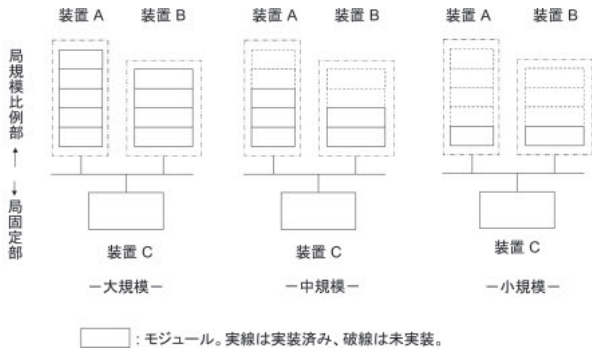


図 6.31　ビルディングブロック構成の概念[22]

モジュールを単位として、規模に応じてモジュール単位で実装する。通話路装置に関しては、交換機の通話路最大容量 4,800 アーランの範囲で、加入者線交換をはじめ、市外発信・着信交換、市外中継交換、市内中継交換並びにこれらの併合機種、とほとんどすべての領域をカバーしている。

(3) 遠隔制御交換

アナログ電子交換機では D10、D20、D30 の 3 機種で 4 千アーランまでをカバーしたが、D70 ではこの規模範囲を、遠隔制御交換装置（RCS：Remote Control switching System）を併用して、1 機種の交換機で対応している。RCS は、LS（Local Switch）の集線段に自局内折返しトランクを付加して遠隔地にもちだした小局用の交換方式である。この RCS には、親局からの制御リンクが障害になっても自局内通話は可能なように、加入者線信号送受信等の自立機能が付与されている。また、加入者回路等の試験は親局から実施できる。

(4) 制御系

交換用プロセッサが、超 LSI により新たに開発された。全体の構成は、マルチプロセッサ方式を採用している。この方式は、信号処理、保守運用処理等を複数のプロセッサに分担させ、呼接続処理を別の複数のプロセッサに負荷分担させる機能・負荷分散併用のマルチプロセッサ方式である。規模に応じてプロセッサ数を増設できる。機能分散したプロセッサ間通信制御のために通信制御装置（IPC：Inter-Processor Communication control equipment）が設けられている。IPC は競合制御や待合せ制御等をハードウェア論理で行い、系全体の処理効率を向上させている（図 6.32[21]）。

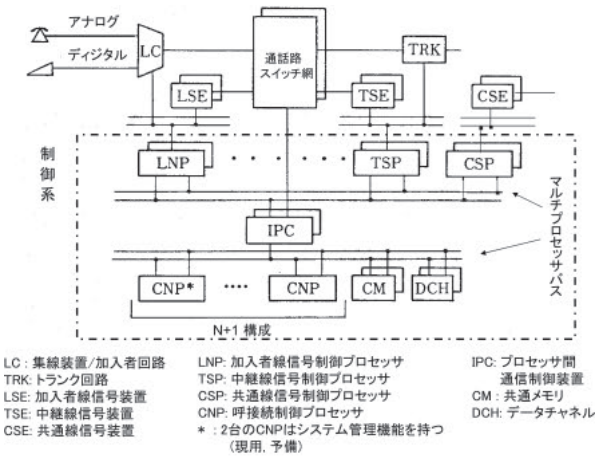


図 6.32　D70 の制御系構成[21]

マルチプロセッサ最大構成での制御系呼処理容量は、D70で45万BHCA（BHCA：Busy Hour Call Attempt）である。これは通話路容量4,800アーランに対して必要な呼処理容量の3倍の値であり呼の特性の変化に対して十分余裕がある。

D70ディジタル加入者線交換機は1983（昭和58）年11月に青森局、名古屋・大同局を最初に、順次商用に供された（図6.33）[67]、（図6.34）。その後、導入が進み、1997（平成9）年12月17日には全国のディジタル化が完了した。なお、ディジタル化の進展や要素技術の発展を受け、D60と同様に改良機が開発された。改良D70あるいは改D70と呼ばれる。改良D70は1993（平成5）年から導入された[69]。

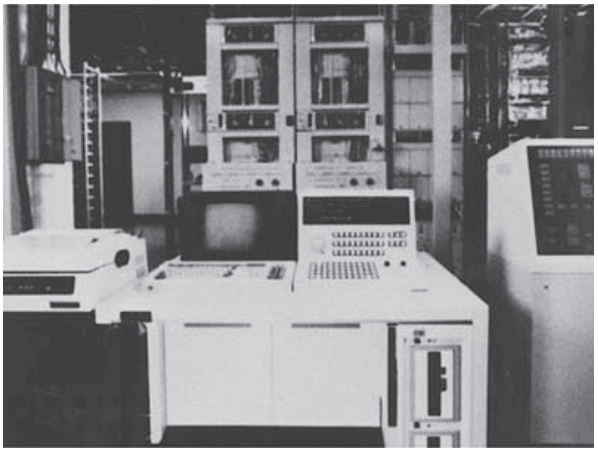


図6.33　D70形ディジタル市内交換機（青森局）[67]

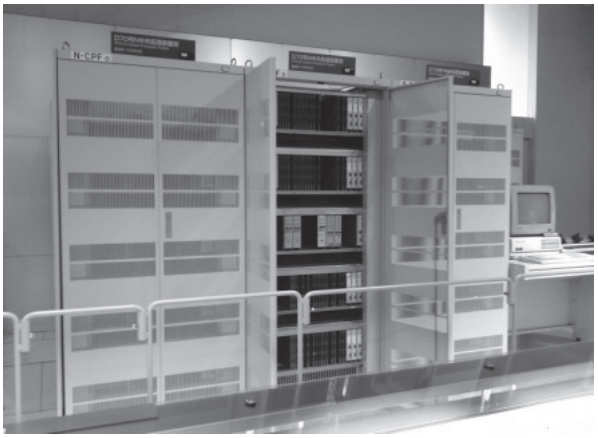


図6.34　D70形ディジタル市内交換機
（所蔵：NTT技術史料館）

参考文献

1）A. H. Reeves, Past, present and future of PCM, IEEE Spectrum, vol.2, no.5, pp.58-63, 1965.
2）W. M. Goodall, Telephony by pulse code modulation, Bell System Technical Journal, vol.26, no.3, pp.395-409, 1947.
3）喜安善市，情報通信の源流を求めて―通信研究者の回想，三田出版会，1997.
4）C. E. Shannon, Communications in the presence of noise, Proc. IRE, vol.37, no.1, pp.10-21, 1949.
5）染谷勲，標本化定理のこと，電子通信学会誌，vol.65，no.7，pp.695-698，1982.
6）小川英光，標本化定理と染谷勲，電子情報通信学会誌，vol.89，no.8，pp.771-773，2006.
7）ニュース，時分割形全電子交換機 東大で完成，電気通信学会誌，vol.41，no.8，p.821，1958.
8）尾佐竹徇，秋山稔，AO-1形全電子交換機並びに時分割方式の考察，電気通信学会誌，vol.42，no.4，pp.401-407，1959.
9）秋山稔，黎明期における電子交換方式の研究，電子情報通信学会通信ソサイエティマガジン，no.1，pp.4-10，2007.
10）池田博昌，電気通信技術開発物語 電子交換編（その5）―ディジタル電話交換システム―，電気通信，vol.58，no.581，pp.29-44，1995.
11）H. E. Vaughan, Research model for time-separation integrated communication, Bell System Technical Journal, vol.38, no.4, pp.909-932, 1959.
12）M. Sakauchi and S. Yamada, Dr. Hiroshi Inose's pioneering contributions to digital switching systems and his outstanding leadership in informatics, IEEE Communications Magazine, vol.46, no.12, pp.13-15, 2008.
13）H. Inose and J. P. Runyon, Time division switching system for telephone system utilizing time slot interchange, U.S. Patent 3172956, filed Apr. 27, 1960, published Mar. 9, 1965.
14）尾佐竹徇，秋山稔，並列PCMスイッチング方式，電気通信学会誌，vol.43，no.6，pp.719-724，1960.
15）H. Nyquist, Certain topics in telegraph transmission theory, Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, vol.47, no.2, pp.617-644, 1928.
16）P.L. Butzer, P.J.S.G. Ferreira, J. R. Higgins, S.

Saitoh, G. Schmeisser and R. L. Stens, Interpolation and sampling: E.T. Whittaker, K. Ogura and their followers, Journal of Fourier Analysis and Applications, vol.17, no.2, pp.320-354, 2011.
17) Hans Dieter Luke, The origins of the sampling theorem, IEEE Communications Magazine, vol.37, no.4, pp.106-108, 1999.
18) M. Unser, Sampling-50 Years after Shannon, Proc. IEEE, vol.88, no.4, pp.569-587, 2000.
19) E. Meijering, A chronology of interpolation from ancient astronomy to modern signal and image processing, Proc. IEEE, vol.90, no.3, pp.319-342, 2002.
20) ジョン・ガートナー（著），土方奈美（訳），世界の技術を支配するベル研究所の興亡，文藝春秋，2013.
21) 川島幸之助，宮保憲治，増田悦夫，最新コンピュータネットワーク技術の基礎，電気通信協会，2003.
22) 愛澤慎一（編著），やさしいディジタル交換、電気通信協会，1983.
23) 猪瀬博，藤崎博也，齊藤忠夫，相互同期系の理論，電気通信学会誌，vol.49，no.4，pp.755-761，1966.
24) 尾佐竹徇，秋山稔，高羽禎雄，西沢正男，独立同期PCM中継方式，電気通信学会誌，vol.47，no.2，pp.210-219，1964.
25) 猪瀬博（編），PCM通信の基礎と新技術，産報，1968.
26) 猪瀬博，宮川洋（編著），PCM通信の進歩，産報，1974.
27) 猪瀬博，3段時分割交換線群の呼損率およびジャンクタ容量，電気通信学会誌，vol.44，no.6，pp.934-941，1961.
28) 猪瀬博，斉藤忠夫，タイムスロット入替方式による三段時分割交換網，電気通信学会誌，vol.49，no.3，pp.409-417，1966.
29) H. Inose, Time slot interchange in time-division electronic exchange, Journal of the Faculty of Engineering, University of Tokyo, vol.XXVIII, no.2, pp.121-233, 1965.
30) 学士院，工学博士 猪瀬博君の「PCM統合通信網におるタイムスロット入替方式の研究」に対する授賞審査要旨，1979年6月11日，www.japan-acad.go.jp/pdf/youshi/069/inose.pdf（参照2014.4.15）
31) 猪瀬先生追悼集刊行会編集，猪瀬博先生の思い出，猪瀬先生追悼集刊行会，2001.
32) R. J. Chapuis and A. E. Joel, Jr., Electronics, Computers, and Telephone Switching, North-Holland Publishing Company, 1990.
33) 河野善彌，近藤哲生，檜山邦夫，木村俊宏，陳慧，有限状態機械モデルに準拠した設計方式の改善，情報処理学会 ソフトウェア工学研究会研究報告，vol.2010-SE-168，no.8，pp.1-8，2010.
34) 秋山稔，並列PCMスイッチング方式，特願昭34-35271（出願1959.11.09），特許第316716号，登録1964.06.09.
35) 齊藤忠夫，情報ネットワークの半世紀，電子情報通信学会 通信ソサイエティマガジン，no.26，pp.153-158，2013.
36) 猪瀬博，斉藤忠夫，時分割交換方式，特願昭39-74295（出願1964.12.29），第昭42-1895号，公告1967.01.28.
37) H. Inose and T. Saito, Time division switching system, U.S. Patent 3446917, filed June 7, 1965, published May 2, 1969.
38) 千葉由一，早川映，脇村慶明，岩瀬康政，新ノード狭帯域系・アクセス系ハードウェア技術，NTT R&D，vol.45，no.6，pp.515-524，1996.
39) 秋山稔，情報交換システム，丸善，1998.
40) 吉田庄司，ディジタルシステム実用化の道―INSを指向したディジタル交換・伝送統合システム―，研究実用化報告，vol.34，no.11，pp.1473-1518，1985.
41) 池田博昌，ディジタル交換方式の実用化，研究実用化報告，vol.40，no.5，pp.571-624，1991.
42) 葉原耕平，ディジタル交換技術の研究開発―人と技術の系譜―，電子情報通信学会誌，vol.90，no.6，pp.457-469，2007.
43) 池田博昌，局用ディジタル交換機の開発を顧みて，電子情報通信学会誌，vol.89，no.1，pp.76-79，Jan. 2006.
44) 花輪幸四郎，実験用DEX-T1号交換機の概要，研究実用化報告，vol.16，no.11，pp.2533-2550，1967.
45) 五島一彦，時分割4線式交換回路網の構成についての考察，研究実用化報告，vol.15，no.7，pp.1171-1194，1966.
46) 五島一彦，空間分割形集線装置を含むPCM交換系の最適設計について，研究実用化報告，vol.16，no.10，pp.2061-2073，1967.
47) 大和淳二，葉原耕平，DEX-T1号交換機の通話路

構成，研究実用化報告，vol.16，no.11，pp.2551-2580，1967.
48）大和淳二，小野昌道，臼田昭吾，塚田啓一，梶原正聿，PCM 交換における平衡相互同期，研究実用化報告，vol.16，no.10，pp.2013-2041，1967.
49）J. Yamato, M. Ono and S. Usuda, Synchronization of a PCM integrated telephone network, IEEE Trans. on Communication Technology, vol.COM-16, no.1, pp.1-11, 1968.
50）葉原耕平，交 40 号 A 時分割通話路実験装置，研究実用化報告，vol.16，no.11，pp.2639-2652，1967.
51）A. E. Joel, Jr., Digital switching - How it has developed, IEEE Trans. on Communications, vol.COM-27, no.7, pp.948-958, 1979.
52）加藤満左夫，高月敏晴，データ交換，電子通信学会誌，vol.61，no.4，pp.435-443，1978.
53）P. Baran, On distributed communications, IEEE Trans. on Communications Systems, vol.CS-12, no.1, pp.1-9, 1964.
54）D. W. Davies, K. A. Bartlett, R. A. Scantlebury, and P.T. Wilkinson, A digital communication network for computers giving rapid response at remote terminals, Proc. of the first ACM Symposium on Operating System Principles, pp.2.1-2.17, 1967.
55）笠原芳郎，手塚慶一，長谷川利治，ディジタルデータ伝送システムについて，電気通信学会通信方式研究会資料，1962.1.
56）T. Hasegawa, Y. Tezuka, and Y. Kasahara, Digital data dynamic transmission systems, IEEE Trans. on Communication Technology, vol.COM-12, no.3, pp.58-65, 1964.
57）加藤満左夫，ディジタルデータ交換網の開発，研究実用化報告，vol.31，no.7，pp.1209-1266，1982.
58）加藤満左夫，電気通信技術開発物語―電子交換編（その 7）―，電気通信，vol.58，no.583，pp.20-36，1995.
59）加藤満左夫，電気通信技術開発物語―電子交換編（その 8）―，電気通信，vol.58，no.584，pp.69-90，1995.
60）石野福彌，通信ソフトウェアの研究実用化，研究実用化報告，vol.41，no.5，pp.547-590，1992.
61）橋田温，川島幸之助，篠岡信，DDX-2 パケット交換網の網構成，研究実用化報告，vol.26，no.11，pp.2979-2990，1977.
62）石野福彌，砺波修一，門田充弘，大山茂，大容量パケット交換方式，研究実用化報告，vol.35，no.5，pp.461-469，1986.
63）石野福彌，渡辺一男，大山茂，矢代善一，パケット交換機の大容量化について，電子通信学会技術研究報告（SE81-59），vol.81，no.112，pp.55-62，1981.9.
64）大山茂，矢代善一，石野文明，本田隆司，交換方式，特願昭 56-127406（出願 1981.8.14），特開昭 58-29286，公開 1983.2.21.
65）葉原耕平，清野浩一，高橋達郎，電話交換システム，電子情報通信学会「知識ベース」，5 群－4 編－2 章，電子情報通信学会，2010.
66）五嶋一彦，松尾勇二，D60/70 ディジタル交換方式，電子情報通信学会誌，vol.67，no.5，pp.501-523，1984.
67）日本電気社史編纂室，日本電気株式会社百年史，日本電気株式会社，2001.
68）佐藤隆昭，福田晴幸，俵寛二，田中公紀，中村雅夫，容量の倍増と装置の小形化で経済的な中継網を構築―ディジタル化に対応する最新中継交換機（改良 D60）の開発―，NTT 技術ジャーナル，vol.2，no.11，pp.57-60，1990.
69）NTT 情報通信用語集，URL：http://www.ntt-review.jp/yougo/，（参照：2014.12.3）.
70）保坂務，加納貞彦，共通線信号方式，電子通信学会誌，vol.64，no.5，pp.488-493，1981.
71）松尾勇二，No.7 共通線信号方式とその応用，電子通信学会誌，vol.67，no.8，pp.861-863，1984.
72）加納貞彦，CCITT 活動の一体験― No.7 共通線信号方式に電電公社提案が採用されるまで―，電気通信，vol.41，no376，pp.30-33，1978.
73）秋山稔，五嶋一彦，島崎誠彦，ディジタル電話交換，産業図書，1986.
74）城水元次郎，電気通信物語―通信ネットワークを変えてきたもの，オーム社，2004.
75）井鍋泰宣，林敏夫，内村国治，吉田耕一，2 チップ化加入者回路 LSI，研究実用化報告，vol.37，no.8，pp.435-441，1988.

7 サービス総合ディジタル網（ISDN）

電話網、テレックス網、データ交換網、ファクシミリ（FAX）通信網などが、個別に開発され運用されていた。ユーザからの利便性や、また設備の経済性から、これらの異なるサービスを同一の加入者線で一元的に提供しようというビジョンが出てきた。ところで、情報がすべてディジタル化されて、1, 0 のディジタル情報のみがネットワーク内を流通するならば、この課題は解決できることになる。この考えで長年研究開発され、実現されたのが、サービス総合ディジタル網（ISDN：Integrated Services Digital Network）である。概念図を図 7.1 に示す[1), 2)]。

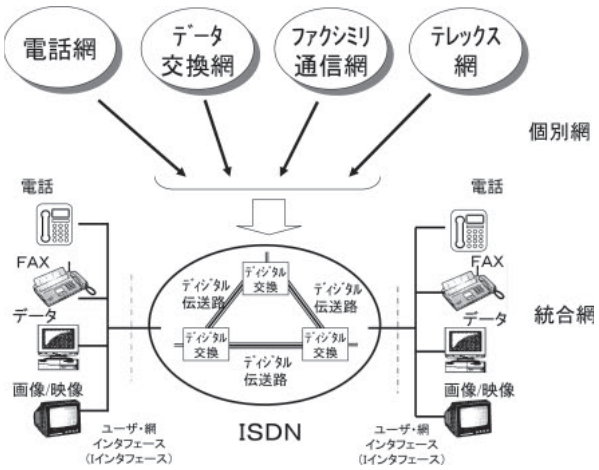


図 7.1　ISDN の概念[2)]

7.1 サービスのマルチメディア化

昭和 40 年代になると、コンピュータの出現やテレビの普及により、電気通信網によって、音声だけではなくデータや画像（静止画、動画）も送ろうとする企画が出てきた。わが国において、いわゆる積滞解消（1978（昭和 53）年）や全国自動即時化（1979（昭和 54）年）が実現すると、その次はサービスの充実であるとの考えから、非電話系サービスを含むマルチメディアにどのように対処するかが課題となってきた。今から見ると、非常に早い段階、すなわち昭和 40 年代の初めに、「通信サービス総合網」の概念が提案されている[3), 4)]。また、電電公社総裁の米澤滋が、国会の逓信委員会において、「情報化社会の発展に寄与するため、電子交換方式を採用して、データ通信、テレビ電話、加入ファクス等の画像通信を含め、総合電気通信網の形成を推進する考えであります。」と答弁している。（1971（昭和 46）年 2 月 2 日（火）、国会議事録より引用）

さらに、電電公社副総裁の北原安定が、1978（昭和 53）年の国際コンピュータ通信会議（ICCC）と、1979 年のテレコムフォーラムで、高度情報通信システム（INS：Information Network System）の構想を提唱した。これは、いわゆる非電話系メディアに対するサービスを含めたサービス形態に関するビジネス構想であり、大きな反響を呼んだ。INS は、次に述べる ISDN の国際標準化の動きを加速したと言える。

北原の提唱の前年、1977 年に、日本電気会長・小林宏治が国際通信展「インテルコム 77」で、「コンピュータ技術とコミュニケーション技術の融合」という構想を C&C というネーミングにより提示した。コンピュータ側から大きな方向性を示したものとして特筆される。

7.2 国際標準化

電気通信の国際標準化は、国際連合傘下の国際電信電話諮問委員会（CCITT）で行われていた。現在は、国際連合の国際電気通信連合（ITU：International Telecommunication Union）と称される常設機関が担当している。ITU には、電気通信関連の標準化を担当する ITU-T（Telecommunication Standardization Sector）、無線関連の標準化を担当する ITU-R、開発途上国支援を担当する ITU-D の 3 セクタがある。

ここで、ISDN の標準化に至る過程を述べる。CCITT における、1969 年からの会期（4 年毎に 1 会期）に PCM に関する課題を研究する特別部会が設立され、その課題の中で「ディジタル統合網」という言葉と、「多様なサービスの総合」の考え方が明記された。1971 年には「ディジタル統合網」として IDN（Integrated Digital Network）、多様なサービスの総合」として ISN（Integrated Services Network）が案としてあげられた。このとき、日本の代表団の 1 人であった島田博一が、ISN に“Digital”を追加することを提案し、議論の結果、正式名称として使われるようになった。すなわち、Integrated Services Digital Network という言葉の誕生である。また ISDN という略語は 1972（昭和 47）年 11 月に日本から提出された寄書（contribution）に登場し、CCITT では最初に使われた[5), 6)]。その寄書の 1 ページ目を図 7.2 に示す。

C.C.I.T.T.
JOINT STUDY GROUP XI/Sp.A
Sp.D MEETING

Temporary Document No.2-E

Original : English

28 November 1972

SOURCE: JAPAN

TITLE : REPLY TO CIRCULAR NO. 199 - INTEGRATED SERVICES DIGITAL NETWORK

I. Views on study of integrated services digital network

From the experience gained in Japan, the following views might be of use for the CCITT in conducting the studies of integrated services network, ISN.

1. ISN may be interpreted in various aspects and can be realized to some extent also in an analogous network provided with the stored programme control and common channel signalling. To avoid the diversity of opinions, it is necessary first of all to unify various interpretations in the study of integrated services digital network, ISDN.

(以下 略)

図 7.2　日本寄書の抜粋（世界で最初に ISDN の略語を用いた文書）[5]

当時の通信網は、アナログ方式が全盛の時代であり、各国でディジタル技術をどのように網に導入していくかの検討が始められていた。ディジタル化は、中継網から開始されたが、その本質は、すべての情報をディジタル形式のまま扱うことにある。このようなビジョンのもとに、日本及び欧州諸国では積極的に伝送路と交換機のディジタル化を進める機運にあった。加入者線の部分もディジタル化すれば音声・データ・画像情報を同じ加入者線で扱うことができる。したがって、加入者線での端末とのインタフェースの規定が大きな課題である。このような背景で、ITU において 1977 年から ISDN が具体的な検討課題として取り上げられ、1984（昭和 59）年に暫定勧告が、そして 1988（昭和 63）年 11 月に本格勧告が承認された。この標準化にあたっては、日本から多数の代表が積極的に貢献した[7]。なお、1984（平成元）年の総会で、ISDN に関する勧告体系は I シリーズとされた。これに対しても、加納貞彦（電電公社、現 NTT）の尽力が大きかった[1]。

ISDN の標準化の過程で、相互には通信できない多種・多様な端末に対し、国際的な標準化インタフェースを提供することが大きな技術的課題であった。既存の加入者線に対するインタフェースは、基本インタフェース（Basic Rate Interface）と呼ばれた。これに対しては、様々な要求条件が各国から出され、その解が追求された。インタフェース構造で見れば、当初は各国のサービス要求と加入者線伝送方式の実現見通しを反映して次のような様々なインタフェース構造が提案された。

B＋d＋d、

B＋D、

B＋b＋D

ここで、

B：64kbit/s の通信用チャネル、

b：16kbit/s の通信用チャネル、

D：16kbit/s の制御信号用チャネル、

d：8kbit/s の制御信号用チャネル

審議を重ね最終的に既存の加入者線の伝送限界に近い 2B＋D という形で一本化され標準化された。これは、どの国も試行していない形態であり、平等な形で結着した。2B は、ある意味で 2 回線化と言える。

さらに、1 次群速度インタフェース（Primary Rate Interface）としては、日本・北米系の 1.5Mb/s 系列と欧州系の 2Mb/s 系列とについて nB＋D のインタフェースが標準化され、併せて NTT から提案された H_0（384kb/s）、H_1（1 次群をフルに使うインタフェース）も合意が得られた。ISDN のインタフェース構造を図 7.3 に示す[8),9)]。これは、I インタフェースと呼ばれる。なお、ディジタル伝送路は階層的に多重化される。それをディジタルハイアラーキというが、その最初の層が 1 次群である。日本・北米系では、PCM 回線 24 チャネルに相当（PCM-24）する。これは、その伝送路の利用形態である。

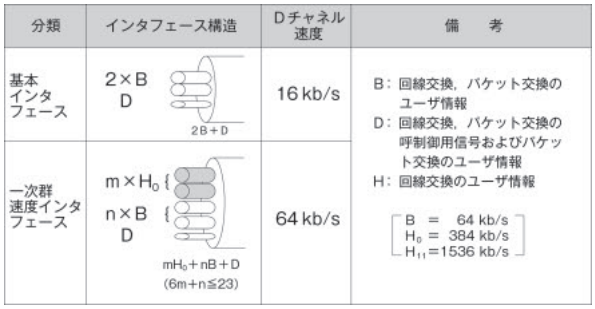


図 7.3　ISDN のインタフェース構造[8]

インタフェースの規定点と端末の接続例を、図 7.4 に示す[2]。図の上の方のブロックが規定点を示し、下の方が接続例である。TE1 は ISDN 標準端末、TE2 は ISDN 非標準端末である。ISDN では、既存の端末を含め将来想定される端末を接続できるようにするため、端末と網との接続点が明確にされ、その点の仕様が規定されている。ITU-T の勧告では、接続点として、図に示すように網側からユーザ側へ向けて U、T、S、R の 4 点を規定している。ITU-T では、これらのうちの T 点、即ち、DSU（Digital Service Unit、宅内回線終端装置）の端末側の点をユーザ・網間の分界点として推奨している。これは、DSU をネットワー

ク側の設備とするのが、他のネットワークと整合がとれるからである。しかし、わが国では、DSU をモデムと同じユーザ側の装置と位置付け、U 点もインタフェース点として許容している。

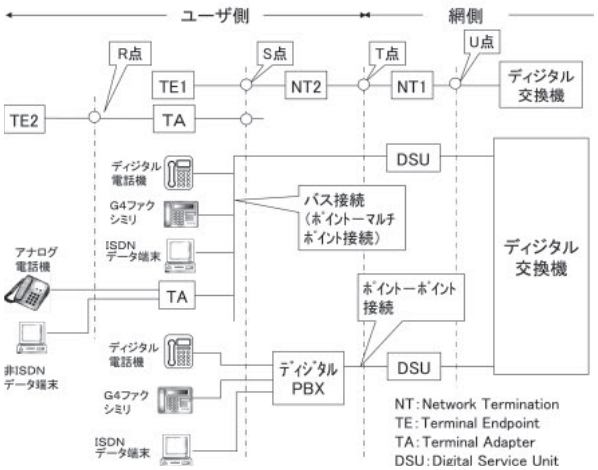


図 7.4　インターフェース規定点と端末接続例 [2)]

7.3 ISDN システムの実現

わが国（電電公社）では、INS の実現のため、国際標準化と並行して、あるいは先行して研究開発が進められた。まず、INS モデルシステムとして、現用の局を対象として実験が大々的に実施された。その後、商用システムが開発され、導入に至った。

7.3.1　INS モデルシステムの実験

電電公社では、全社を挙げて INS モデルシステムの実験に取り組んだ。モデル地域として東京三鷹局に D70、霞ヶ関局に集線装置を設けて光回線で結び、ユーザを含めた大々的な実験が行われた [10)]。モデルシステムには、当時想定されたあらゆる新技術が盛り込まれた。加入者線交換機 D70 はもちろん、最新の光伝送システム、家庭までの光化をねらった FTTH（Fiber To The Home）、そのためのファイバ接続技術、様々な宅内機器、画像システム、無線技術、衛星回線、そしてこれらをフルに活用した新サービスの試み、などである。このサービスを提供する三鷹地区では、一般加入電話約 1 万加入を対象とし、その中でディジタル電話機約 400 台、非電話系宅内機器約 1,100 台でのサービス提供となった。モデルシステムの設計の着手時点（1981（昭和 56）年）では、CCITT の議論はまだそれほど進展していなかったので、暫定的な仕様で設計が進められるとともに、標準化にも積極的な提案がなされた。INS モデルシステムによる試行運用は 1984（昭和 59）年 9 月から約 2 年半にわたって進められ、技術的にも、運用面でも貴重な経験を積んでいる [11)]。

これは世界に先駆けた実験であったため、加入者インタフェースに独自のいわゆる「Y インタフェース」が採用された。すなわち、電話用に 64kbit/s（通称 B1 チャネル）、各種ディジタル機器用に 16kbit/s（B2 チャネル）、さらに B1、B2 チャネル制御データ用にそれぞれ 4kbit/s（D チャネル）の計 88kbit/s を用いる方式であった。その後の標準化では、7.2 節で述べたように、加入者インタフェースは、2B+D とされた。

7.3.2　ISDN システムの商用化

1983（昭和 58）年から導入が開始された電話用ディジタル交換機 D70 は急速に全国展開されていた。そこで、D70 に新しいモジュールを追加して、ISDN サービスを提供できる構成が採られた。これは、ディジタル交換機の開発当初からの狙いであった。ISDN システムの構成を図 7.5 に示す [8)]。

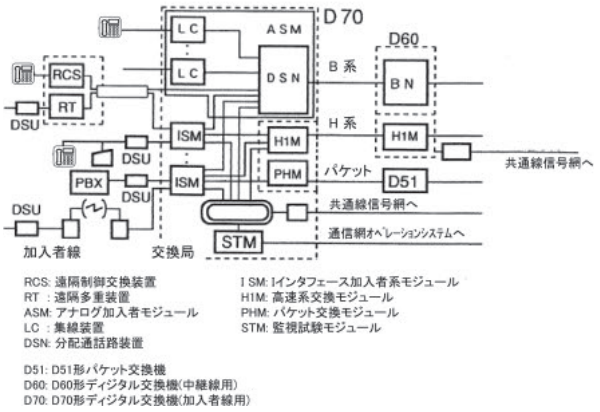


図 7.5　ISDN システムの構成 [8)]

図において ASM はアナログインタフェースを提供するモジュールで、従来の電話用の交換機 D70（A）とほぼ同じ構成である [12)]。新規に開発された I インタフェース加入者系モジュール（ISM）は、次の機能を持っている。すなわち、自局内については折り返しを行う。また、中継呼については、呼ごとに B 系（基本インタフェース用）中継網かあるいは H 系（高速用）中継網、さらにはパケット網に振り分ける。多様化するネットワークサービスを効率的、経済的に提供できるように、ISDN システムにおいては、機能をい

くつかの基本的なモジュールに分割し、各モジュール間を標準的なインタフェースで結合したフレキシブルなシステム構成が採用されている。また、散在するユーザを効率的に収容する手段として、経済化の進展の著しい光ファイバケーブルを利用した遠隔多重化装置 RT を設けている。

システム開発は、標準化の検討作業とまったく並行して実施された。すなわち、標準化の会議に開発実績をもとにした具体的な提案を行い標準化の進展に貢献するとともに、決まった結果をいち早くシステム開発にフィードバックする方法がとられた[13]。その結果として、1988（昭和 63）年 4 月 19 日に基本インタフェースによる回線交換サービスが開始された。そのシステムに '88 年勧告を完全に織り込むことに成功し、'88 勧告完全準拠のサービスが世界で最初に提供された。正式勧告が決定されたのは、1988 年 11 月である。引き続いて、1989 年 6 月には H 系回線交換サービスが、1990（平成 2）年 4 月にはパケット交換サービスが順次開始された。図 7.6 に、ISDN の標準化と主要国の初期の開発状況を示す[13]。

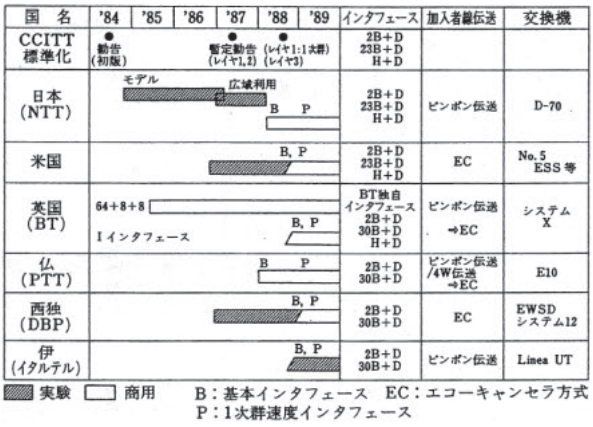


図 7.6　ISDN 標準化と主要国の ISDN 初期開発状況[13]

このようにして開始された ISDN サービスは、当初は画期的なサービスが見つからず需要は伸びなかった。しかし、1990 年代後半にインターネットの商用利用が始まると、インターネットアクセス回線としてのニーズが急速に高まり、加入契約は飛躍的に増加した。しかし、この傾向も 21 世紀になってブロードバンド回線の登場と、常時接続制度の開始に伴い利用者は ISDN から離れる傾向が強くなり、2001（平成 13）年をピークに下降をたどった。契約回線数の推移を図 7.7 に示す。

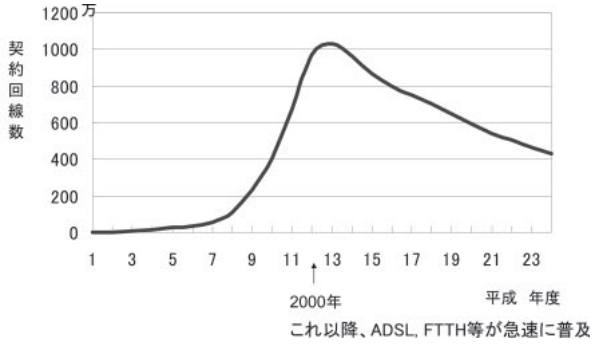


図 7.7　ISDN 契約回線数の推移
（総務省公表資料より著者作成）

7.3.3　加入者線伝送方式の開発

ISDN の基本インタフェースでは、2 本の B チャネル（各々64kb/s）に加えて 1 本の D チャネル（16kb/s）を用いるので、従来の加入者線 1 回線で、上り・下りともそれぞれ 144kb/s の通信速度が必要になる。その実現のために、次の方式が開発された。なお、わが国と欧米では異なる方式を採用している。

わが国の ISDN では、回路実現の容易性を考慮し、1 本の加入者線上で転送方向を交互に切り替え、各方向において 144kb/s の 2 倍以上の 320kb/s の速度で伝送させている。この方式は、図 7.8 に示すように、加入者線の両側に送受 2 つのバッファメモリと送受信回路、切り替えスイッチを設置し、上り方向と下り方向を、両端で同期をとりながら、2.5ms（即ち、400 回／秒）毎に切り替えることにより実現されている。加入者線上でピンポンを行っているように交互に伝送することから、通称ピンポン伝送と呼ばれている（図 7.8）[2]。正式には TCM（Time Compression Multiplexing、時間軸圧縮双方向多重方式）または TDD（Time Division Duplexing、時分割双方向伝送方式）と呼ばれる。

一方、欧米では、全二重通信の実現策として、エコーキャンセラの原理による方式が採用されている。すなわち、図 7.9 に示すように[2]、2 線式加入者線の両側に設けられているハイブリッド回路を経由して高周波の送信信号が受信側へエコーとして漏れ、受信信号と重なってしまう問題を、ADF（Adaptive Digital Filter、適応型ディジタルフィルタ）と呼ばれる回路を導入して解決している。ADF により、エコーと同一の波形を生成し、エコーの重畳した信号からエコー部分を抜き取るようにしているのである。

採用されている方式が異なるのは、加入者線の特性による。すなわち、日本と米国では加入者線長分布が異なる。日本では加入者線長が短いのでロスが少ない。そのため、高速の送信が可能となる。また、加入

者線ケーブルについて、日本では紙絶縁ケーブルが多く用いられていたが、欧米ではプラスチック絶縁ケーブルが多い。近端漏話特性の点で紙絶縁ケーブルが劣る。このような事情により、上記の方式となった[14]。

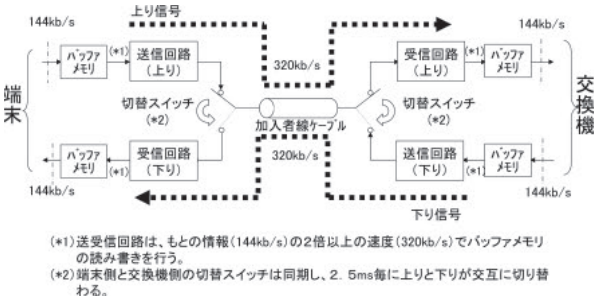


図 7.8　ピンポン伝送方式のしくみ[2]

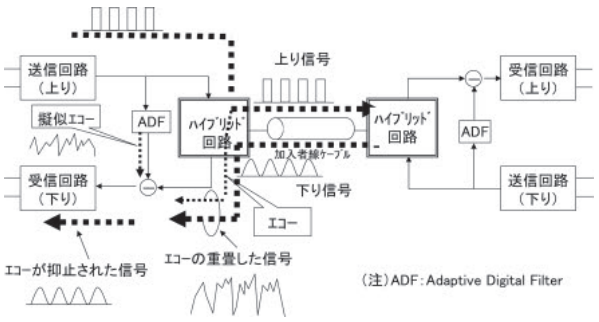


図 7.9　エコーキャンセラ（EC）方式のしくみ[2]

参考文献

1）加納貞彦，ISDN におけるユーザ網インタフェース，電子情報通信学会誌，vol.70，no.7，pp.713-716，1987.

2）川島幸之助，宮保憲治，増田悦夫，最新コンピュータネットワーク技術の基礎，電気通信協会，2003

3）南敏，青沼英生，通信網の構成法，特願昭 41-59885，1966.9.12.

4）熊谷伝六，水口一，南敏，中村正夫，通信サービス総合網，電子通信学会誌，vol.50，no.6，pp.1077-1084，1967.

5）島田博一，世界語になった ISDN の背景―専門用語 ISDN はいかにして創られたか，ニューメディア，pp.84-87，1986.8.

6）K. Habara, ISDN: A look at the future through the past, IEEE Communications Magazine, vol.26, no.11, pp.25-32, 1988.

7）加納貞彦，北見憲一，ISDN の標準化～パイオニアとしての先駆的な役割とその限界～，電子情報通信学会通信ソサイエティマガジン，no.17，pp.63-69，2011.

8）池田博昌，ディジタル交換方式の実用化，研究実用化報告，vol.40，no.5，pp.571-624，1991.

9）石川宏，サービス総合ディジタル網，電子情報通信学会誌，vol.70，no.11，pp.1171-1178，1987.

10）葉原耕平，ディジタル交換技術の研究開発―人と技術の系譜―，電子情報通信学会誌，vol.90，no.6，pp.457-469，2007.

11）池田博昌，局用ディジタル交換機の開発を顧みて，電子情報通信学会誌，vol.89，no.1，pp.76-79，Jan. 2006.

12）五嶋一彦，松尾勇二，D60/70 ディジタル交換方式，電子情報通信学会誌，vol.67，no.5，pp.501-523，1984.

13）池田博昌，電気通信技術開発物語　電子交換編（その 6）―ISDN 交換システム―，電気通信，vol.58，no.582，pp.31-49，1995.

14）雲崎清美，滝川好比郎，小宮菱一，ISDN を支える加入者線伝送技術（1），電子情報通信学会誌，vol.73，no.8，pp.868-878，1990.

8 あとがき・謝辞

今日、日常生活において、情報通信は必須のものとなっている。いわゆるスマホ（スマートフォン）や携帯電話、タブレットやパソコンを介して、いろいろなサイトにアクセスし、必要な情報を手に入れたり、ショッピングをしたり、旅行の手配をしたり、生活のほとんどすべてに、情報通信が欠かせない。

特定の宛先との情報通信には情報交換が必要である。初期には人手でもって交換接続がされたが、大量の交換を自動的に行う機械が発明されることとなる。わが国においては、1928（昭和3）年にサービス開始のステップバイステップ方式、続いて、クロスバ方式（わが国でのサービス開始は1955（昭和30）年）、アナログ電子交換方式（1971（昭和46）年）、ディジタル電子交換方式（1982（昭和57）年）と進化してきた。そしてISDNシステムの完成（1988（昭和63）年）により、ついに世界において完全なトップランナーとなった。本調査は、ここまでを対象とした。新しい交換方式の導入の間隔は、歴史的に、30年、20年、10年というオーダで短くなってきた。技術進歩は大変速い。

わが国における交換システムは、第二次世界大戦前から、欧米からの技術導入によってきた。しかしながら、自主技術開発の意気は高く、大戦後の経済復興と合わせて、クロスバ交換方式、電子交換方式と、自主技術により開発が進められてきた。この過程において、産学官の連携プレーが大変有効に機能したといえよう。いわば、オールジャパンの力である。欧米、とくに米国のAT&Tの先行指標が提示された時の結束力には目を見張るものがある。もちろん、それに至るまでの意思決定には、時間を要してはいるが。

とくに、交換システム技術分野での電子情報通信学会の果たしてきた役割には極めて大きいものがあったといえる。とりわけ、当学会の現・ネットワークシステム研究会のルーツは、1964（昭和39）年に尾佐竹教授（当時・東京大学）らの尽力により設立された交換研究会であり、2014（平成26）年は、50周年に当たる。歴代の研究会委員長、幹事等の方々に敬意を表したい。

ところで、ディジタル電子交換機以後については、次のような進展となっている。すなわち、1990年代半ばより一般社会においてもインターネットの利用が始まり、その後、劇的な発展により、ほとんどすべての情報流通をインターネットが行うようになってきた。従来の交換機の流れは、2000年代に入り、インターネットに対して通信品質保証技術を新たに具備させた次世代ネットワーク（NGN：Next Generation Network）へと融合的に発展した。このようにして、情報交換システムは、100年以上にわたり進展してきたが、全面的にインターネットへと急速に移行しつつある。その開発においても、連綿として培われてきたディジタル技術が駆使されているのは言うまでもない。ディジタルをベースに、通信技術、コンピュータ技術、コンテンツ技術が融合し、今や、「通信する」という感覚もなく、日常的に情報社会を満喫している。ただし、それとともに新しい形の社会問題も発生しやすく、人類の幸福に対しては、課題は尽きない。

交換技術の発展を系統的にまとめてきたことを通して、技術開発の流れというものに改めて感じ入った。現在の情報社会の基盤となっているディジタル技術を考えてみると、次のようである。すなわち、それは1937（昭和12）年のPCM（Pulse Code Modulation）の発明に端を発する。しかしながら、すぐに通信の世界に利用されたわけではなく、約10年後の情報理論、トランジスタ、コンピュータの出現まで待つことになる。この時点では、まだ研究レベルで着目する研究者が出てきた段階である。交換システムに対しては、1970年代に入ってようやくディジタル交換システムの本格的な開発が始まった。これは、とくにトランジスタがLSIという形でコスト的、容量的に実用になったからである。PCMが発明されてから約40年である。また、ディジタル交換システムの基本原理となった技術には、わが国の研究者によって発明されたものがある。そのひとつは、1957（昭和32）年、猪瀬博によるタイムスロット入替え方式である。すなわち、交換機において一時記憶機能を設け、送信側と受信側のタイムスロットを入れ替える方式である。もうひとつは、1959（昭和34）年の、秋山稔らによる並列PCM交換方式である。直列形に伝送されてきたPCMのビットを並列に変換して交換する方式である。これらの発明も、現実に利用されるのは、半導体の発展により電子素子のコストダウンが図られるまで約20年近く待つことになる。このように、原理の発明から、具体的に広く利用され普及するまでは、実に長い時間を要するものである。逆に言えば、過去に発明された原理（特許）の中には、まだ利用されずに

眠っているものが数多くあると考えられる。他の技術や世の中の要請に注意しながら、それらの原理を具体的に利用することは極めて重要である。10年近く前、わが国において技術経営（Management of Technology）の必要性が指摘された。技術の流れを創り出す原理の発明が重要であることは言を俟たないが、このように長い眼での技術利用の姿勢も重要である。

本報告を終わるにあたり、一言追記しておきたい。個々の技術内容については、対象をあまりにも広くしたこともあり、十分に踏み込めていない。引用している参考文献などを参照していただきたい。本調査がきっかけの一つとなり、いわゆる「先人の肩」の上に立って新しい技術が開拓される一助になればと願いつつ、本報告を終える。

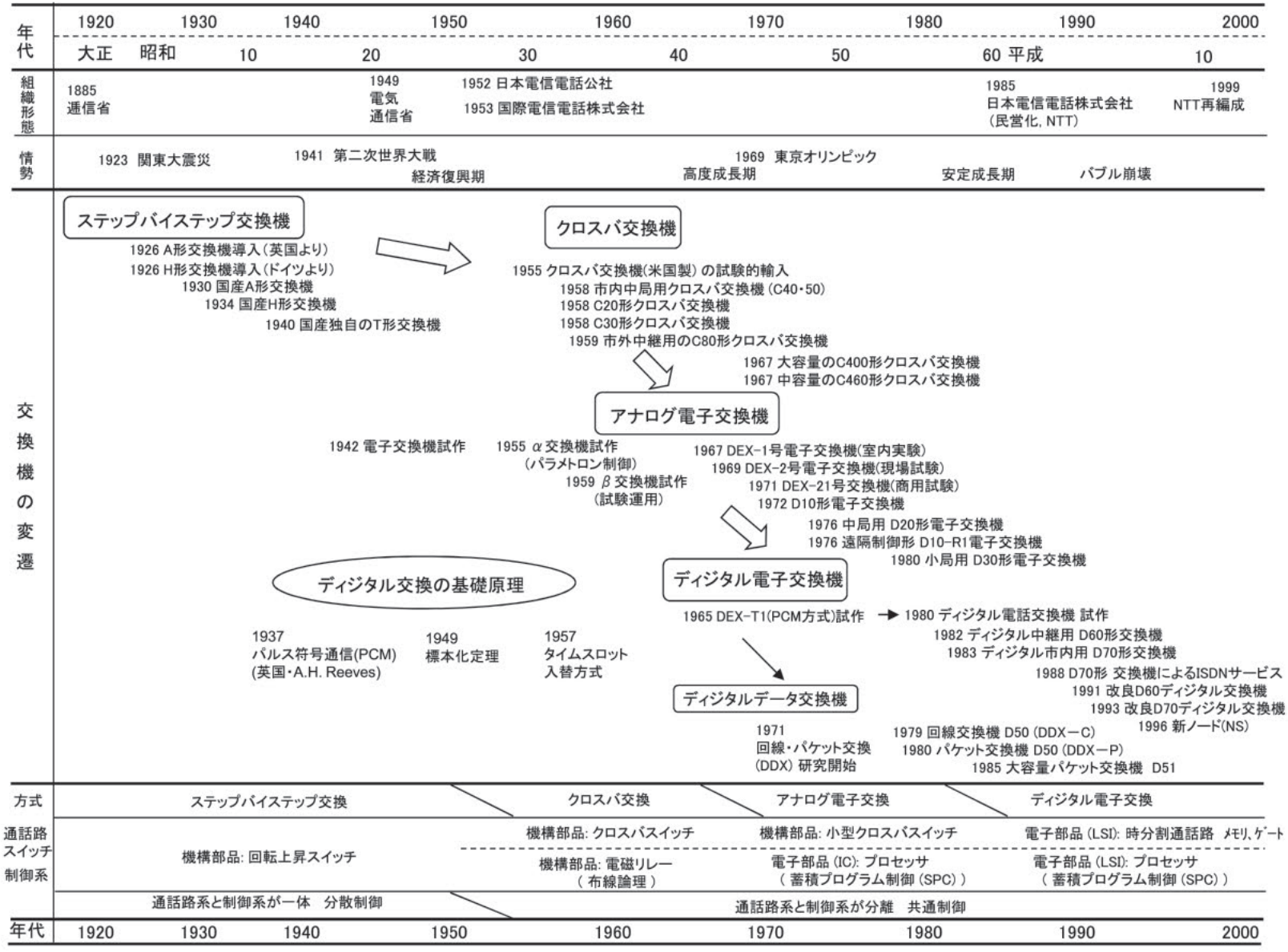
謝　辞

本調査を進める過程においては、非常に多くの方々のご指導・ご支援を頂戴し、大変感謝している。直接ご指導くださった先輩や関連の方々、また関係組織の代表者の方およびご担当くださった方々に、厚くお礼申し上げる。下記に氏名、組織を記す。さらに、調査にあたっては、きわめて多数の文献等を参照させていただいた。多くの著者に感謝をささげる。

秋山　稔氏
葉原耕平氏
池田博昌氏
千葉正人氏
青木利晴氏
丸山勝巳氏
門田充弘氏
吉田　眞氏
大山　茂氏
大野邦夫氏
NTT 情報ネットワーク総合研究所
　渡部信幸氏
　角　隆一氏
　加藤美香氏
NTT 技術史料館
　千葉由一氏
　俵　寛二氏
　寺脇元二氏
西日本電信電話株式会社　北九州支店
門司電気通信レトロ館
　谷口　望氏
NTT アドバンステクノロジ株式会社
　花澤　隆氏
　須田宏一氏
　小林清澄氏
　（前 NTT 情報ネットワーク総合研究所）
　葉原敬士氏
国立情報学研究所
　山田茂樹氏
　橋爪宏達氏
東京電機大学
　宮保憲治氏
流通技術大学
　増田悦夫氏
芝浦工業大学
　新津善弘氏
大阪大学
　木下和彦氏
富士通株式会社　DNA 館
　池田敬昭氏

NTT 武蔵野研究開発センタ　図書館
首都大学東京　図書館（日野）
東京農工大学　図書館（小金井）

交換機の系統図


年代
1920 1930 1940 1950 1960 1970 1980 1990 2000
大正 昭和 10 20 30 40 50 60 平成 10
組織形態
1885 逓信省
1949 電気通信省
1952 日本電信電話公社
1953 国際電信電話株式会社
1985 日本電信電話株式会社（民営化, NTT）
1999 NTT再編成
情勢
1923 関東大震災
1941 第二次世界大戦
経済復興期
1969 東京オリンピック
高度成長期
安定成長期
バブル崩壊
交換機の変遷
ステップバイステップ交換機
1926 A形交換機導入（英国より）
1926 H形交換機導入（ドイツより）
1930 国産A形交換機
1934 国産H形交換機
1940 国産独自のT形交換機
クロスバ交換機
1955 クロスバ交換機(米国製）の試験的輸入
1958 市内中局用クロスバ交換機（C40・50）
1958 C20形クロスバ交換機
1958 C30形クロスバ交換機
1959 市外中継用のC80形クロスバ交換機
1967 大容量のC400形クロスバ交換機
1967 中容量のC460形クロスバ交換機
アナログ電子交換機
1942 電子交換機試作
1955 α交換機試作
（パラメトロン制御）
1959 β交換機試作
（試験運用）
1967 DEX-1号電子交換機(室内実験)
1969 DEX-2号電子交換機(現場試験)
1971 DEX-21号交換機(商用試験)
1972 D10形電子交換機
1976 中局用 D20形電子交換機
1976 遠隔制御形 D10-R1電子交換機
1980 小局用 D30形電子交換機
ディジタル交換の基礎原理
1937 パルス符号通信(PCM) (英国・A.H. Reeves)
1949 標本化定理
1957 タイムスロット入替方式
ディジタル電子交換機
1965 DEX-T1(PCM方式)試作
1980 ディジタル電話交換機 試作
1982 ディジタル中継用 D60形交換機
1983 ディジタル市内用 D70形交換機
1988 D70形 交換機によるISDNサービス
1991 改良D60ディジタル交換機
1993 改良D70ディジタル交換機
1996 新ノード(NS)
ディジタルデータ交換機
1971 回線・パケット交換 (DDX) 研究開始
1979 回線交換機 D50 (DDX－C)
1980 パケット交換機 D50 (DDX－P)
1985 大容量パケット交換機 D51
方式
ステップバイステップ交換
クロスバ交換
アナログ電子交換
ディジタル電子交換
通話路スイッチ制御系
機構部品: 回転上昇スイッチ
機構部品: クロスバスイッチ
機構部品: 小型クロスバスイッチ
電子部品 (LSI): 時分割通話路 ﾒﾓﾘ, ｹﾞｰﾄ
機構部品: 電磁リレー（布線論理）
電子部品 (IC): プロセッサ（蓄積プログラム制御 (SPC)）
電子部品 (LSI): プロセッサ（蓄積プログラム制御 (SPC)）
通話路系と制御系が一体 分散制御
通話路系と制御系が分離 共通制御
年代
1920 1930 1940 1950 1960 1970 1980 1990 2000

交換機の所在一覧

番号	名　　称	形態	所在等	所在地	製作者	製作年	特　　徴
1	時分割全電子交換機 AO-1	展示中	芝浦工業大学	さいたま市 見沼区	東京大学 秋山稔、尾佐竹徇	1959	国産初の全電子化交換機の試作機を大学の研究室で製作したもの。時分割方式は、PAM（パルス振幅変調）方式。日本の電子交換機、時分割形交換機開発に対する先駆的な開発である。交換分野の研究者、技術者に対する啓蒙、動機付け等、多大なる貢献を果たした。
2	D60 形ディジタル電子交換機	展示中	NTT 技術史料館	東京都武蔵野市	日本電気株式会社	1981	伝送交換のディジタル統合を実現する中継用のディジタル交換機である。主な特徴は次の点である。(a) ビルディングブロック構成。通話路系、制御系とも、規模、機能についてブロック化を進め、必要容量に対し、同一アーキテクチャで構成できる。(b) LSI の積極的活用。通話路スイッチ、制御プロセッサに、最新の LSI が開発された。
3	D70 形ディジタル電子交換機	展示中	NTT 技術史料館	東京都武蔵野市	富士通株式会社	1990	端末間ディジタル 1 リンクの形成を実現する加入者線交換用のディジタル交換機である。基本的アーキテクチャは、中継用の D60 形ディジタル交換機と同一である。加入者対応の部分が追加されている。D60 形交換機の特徴に加えて、主な特徴は次の点である。(a) いわゆる BORSCHT 機能を提供する加入者回路の LSI 化。(b) 小規模の加入者群に対応する遠隔制御交換装置。(c) ISDN 用のモジュール（ISM）を付加して、世界で最初の ISDN サービスの提供。
4	D50 形パケット交換機（PS）	展示中	NTT 技術史料館	東京都武蔵野市	日本電気株式会社	1980	ディジタル情報をパケット（宛先ヘッダとユーザ情報で構成）という単位の情報に載せて、最終宛先に送るための交換機。日本で最初の商用パケット交換機。インターネットの原型。
5	D51 形大容量パケット交換機	展示中	NTT 技術史料館	東京都武蔵野市	日本電気株式会社	1991	D50 パケット交換機の構成を全面的に見直し、大幅な性能増加を図った大容量のパケット交換機。パケット処理能力は 1 万パケット / 秒であり、開発当時世界最高速。大きな特徴は主に次の点である。(a) マルチプロセッサ構成の採用による大幅な性能向上。(b) パケット処理装置は、需要規模に応じてビルディングブロック方式で増設可能。(c) X.25 プロトコル制御の LSI 化。

番号	名　　称	形態	所在等	所在地	製作者	製作年	特　　徴
6	D10 形電子交換機	展示中	NTT 技術史料館	東京都武蔵野市	富士通株式会社	1981, 1982	通話路スイッチには小型クロスバスイッチ、制御部にはいわば交換専用の電子計算機を用いた、（アナログ）電子交換機。プログラムを用いて交換動作を行う方式であり、蓄積プログラム制御（Stored Program Control: SPC）と呼ばれる。ソフトウェアの変更・追加により、交換機能の改変（ルーティング、課金方式、新サービスへの柔軟な対処など）が容易になった。また、自動車電話（移動通信）は、電子交換の導入で実現した。2012 年、国立科学博物館の未来技術遺産に認定された（第 00105 号）。
7	C400 形クロスバ交換機	展示中	NTT 技術史料館	東京都武蔵野市	日本電気株式会社 株式会社日立製作所 富士通株式会社	1965	大局用の市内クロスバ交換機。10 年あまりにわたるクロスバ交換機の研究開発の結果開発された、コスト面、性能面で優れた交換機。いわゆる電話の積滞解消の目標達成に向けて大量に導入された。
8	C45 形クロスバ交換機	展示中	NTT 技術史料館	東京都武蔵野市	富士通信機製造株式会社	1962	加入者線交換機 C4 と中継交換機 C5 を併合した市内用クロスバ交換機。クロスバ交換機の経済化を図るために、逐次種々の改良がなされた。所蔵交換機は、C41･51 形である。これは C400 形クロスバ交換機へと発展し、標準機種とはならなかった。
9	T 形ステップバイステップ交換機	展示中	NTT 技術史料館	東京都武蔵野市	富士通信機製造株式会社	1940	国産自主技術として、A 形、H 形両方式の利点を採入れ開発されたステップバイステップ交換機。T 形は通信省形の略。ただし、第二次世界大戦の頃の開発であり、その後、普及はしなかった。
10	A 形ステップバイステップ交換機	展示中	NTT 技術史料館	東京都武蔵野市	日本電気株式会社	1966	関東大震災後、自動交換機の導入が決定され、英国、ATM 社より技術導入された交換機。数年で、国産化された。
11	H 形ステップバイステップ交換機	展示中	NTT 技術史料館	東京都武蔵野市	富士通信機製造株式会社	1961	関東大震災後、自動交換機の導入が決定され、ドイツ、Siemens & Halske 社より技術導入された交換機。数年で、国産化された。
12	C14 形クロスバ交換機	保管中	NTT 西日本・北九州支店　門司電気通信レトロ館	福岡県北九州市門司区	沖電気工業株式会社	1973	端局（End Office）等に適用される最小規模局用の可搬形クロスバ形交換機。C1 系列の最終改良機種。
13	C23 形クロスバ交換機	保管中	NTT 西日本・北九州支店　門司電気通信レトロ館	福岡県北九州市門司区	株式会社日立製作所	1975	端局（End Office）等に適用される小規模局用の可搬形クロスバ形交換機。C2 系列の最終改良機種。

番号	名　　称	形態	所在等	所在地	製作者	製作年	特　　徴
14	C82 形クロスバ交換機	保管中	NTT 西日本・北九州支店　門司電気通信レトロ館	福岡県北九州市門司区	日本電気株式会社	1973	集中局以上の階梯に適用される大局用クロスバ形市外中継交換機。C8 系列の最終改良機種。全国自動即時化に貢献した。
15	C400 形クロスバ交換機	保管中	NTT 西日本・北九州支店　門司電気通信レトロ館	福岡県北九州市門司区	日本電気株式会社	1974	大局用の市内クロスバ交換機。10 年あまりにわたるクロスバ交換機の研究開発の結果開発された、コスト面、性能面で優れた交換機。いわゆる電話の積滞解消の目標達成に向けて大量に導入された。
16	C460 形クロスバ交換機	保管中	NTT 西日本・北九州支店　門司電気通信レトロ館	福岡県北九州市門司区	日本電気株式会社	1971	中局用の市内クロスバ交換機。C400 形交換機の通話路の規摸を小さくし、その他の装置も C400 形のものを縮小またはそのまま使用する形で開発された。
17	D10 形電子交換機	保管中	NTT 西日本・北九州支店　門司電気通信レトロ館	福岡県北九州市門司区	日本電気株式会社	1975	通話路スイッチには小型クロスバスイッチ、制御部にはいわば交換専用の電子計算機を用いた、（アナログ）電子交換機。プログラムを用いて交換動作を行う方式であり、蓄積プログラム制御（Stored Program Control: SPC）と呼ばれる。ソフトウェアの変更・追加により、交換機能の改変（ルーティング、課金方式、新サービスへの柔軟な対処など）が容易になった。また、自動車電話（移動通信）は、電子交換の導入で実現した。
18	D20 形電子交換機	保管中	NTT 西日本・北九州支店　門司電気通信レトロ館	福岡県北九州市門司区	日本電気株式会社	1981	中局規模の（アナログ）電子交換機。D10 形電子交換機の経済化を図ったもの。
19	A 形ステップバイステップ交換機	保管中	NTT 西日本・北九州支店　門司電気通信レトロ館	福岡県北九州市門司区	東京電気通信工作所	1969	関東大震災後、自動交換機の導入が決定され、英国、ATM 社より技術導入された交換機。数年で、国産化された。
20	H 形ステップバイステップ交換機	保管中	NTT 西日本・北九州支店　門司電気通信レトロ館	福岡県北九州市門司区	富士通信機製造株式会社	1966	関東大震災後、自動交換機の導入が決定され、ドイツ、Siemens & Halske 社より技術導入された交換機。数年で、国産化された。
21	AR1 号地域集団電話用ステップバイステップ交換機	保管中	NTT 西日本・北九州支店　門司電気通信レトロ館	福岡県北九州市門司区	沖電気工業株式会社	1965	農林漁業地域における電話需要に早急に対応するために開発された、地域集団自動交換機。半径 5km 以内に 200 加入以上まとまった加入者があるところに設置。ステップバイステップ自動交換装置を可搬形収容箱内に収容し、1 本の加入者回線を最大 10 加入の複数の加入者が共同で利用できるようにした。個別呼出し、秘話式が可能である。定額料金制を採用。

交換機開発年表

元号	年	西暦	日本	海外
明治	22	1889		自動式電話交換機（ステップバイステップ）発明（米国の　ストロージャー　A. B. Strowger）
	38	1905		米国 AEI 社（Automatic Electric Inc.）　本格システム開発
	41	1908		ドイツ DTW 社、電話交換に電子技術を初めて応用（特許出願）
	42	1909		ドイツ　シーメンス・ハルスケ社（Siemens & Halske AG）　ステップバイステップ交換機国産化
大正	4	1915		クロスバ機構の発明（米国の　レイノルズ　J. N. Reynolds）
	7	1918		英国 ATM 社（Automatic Telephone Manufacture Co.）ステップバイステップ交換機国産化
	8	1919		クロスバ自動交換方式を初めて実現（スェーデンの　ヴェツランデル G.A.Betulander）
	12	1923	英国 ATM 社のステップバイステップ交換機商用試験（中国・大連）	
	12	1923	関東大震災からの復興のため自動交換機の導入決定（逓信省）	
昭和	元	1926	A 形ステップバイステップ交換機導入（英国より）（東京・京橋局）H 形ステップバイステップ交換機導入（ドイツより）（横浜・長者町局）	
	5	1930	国産 A 形ステップバイステップ交換機（中野局）	
	9	1934	国産 H 形ステップバイステップ交換機（鶴見局）	
	12	1937		パルス符号通信（PCM）の発明（英国のリーブス　A. H. Reeves）
	14	1939	電子交換機の研究開始（逓信省工務局）1942 試作機完成	
	15	1940	国産独自の T 形ステップバイステップ交換機（奈良局）	
	16	1941		米国ベルシステム　最初の半電子交換方式試作
	18	1943		米国ベルシステム　市外交換用　クロスバ交換機 No.4 商用化
	23	1948		米国ウェスタンエレクトリック社　大都市用クロスバ交換機 No.5 開発
	24	1949	通信情報ディジタル化の基礎となる標本化定理の発表（染谷 勲）	通信情報ディジタル化の基礎となる標本化定理の発表（シャノン）
	25	1950		英国郵政庁研究所および LCT 社（仏）において PAM 式実験機を試作
	26	1951		米国ベルシステム　市内交換用　クロスバ交換機 No.5 商用化
	26	1951	電子交換機の研究再開（電気通信省）	
	27	1952	【日本電信電話公社発足】	
	27	1952	クロスバ交換機導入方針決定	

元号	年	西暦	日本	海外
昭和	27	1952		米国ベルシステム　電子交換機　ECASS 方式発表
	28	1953	【国際電信電話株式会社発足】	
	30	1955	米国製クロスバ交換機（ケロッグ社）の試験的輸入（高崎局）	
	30	1955	電子交換　α交換機試作　（電電公社）	
	31	1956	国産第一号小局用クロスバ交換機の商用化（栃木・三和局）	
	32	1957	タイムスロット入替方式の発明（東大　猪瀬博）PAM 交換機を試作（東大 秋山稔、尾佐竹徇）	
	33	1958	市内中局用クロスバ交換機の開局（武蔵府中局、蕨局）　（のちに C40・50 と命名）	
	33	1958	C20 形クロスバ交換機の開局（玉野西局）	
	33	1958	C30 形クロスバ交換機の開局（平坂局）	
	34	1959	市外用中継交換機 C80 形の開局（仙台局）	
	34	1959	電子交換　β交換機試作　（パラメトロンで制御、電電公社社宅にて試験運用）	
	34	1959	並列 PCM 交換方式の発明（東大　秋山稔）	
	34	1959		ベル研究所において ESSEX（PCM 方式）を試作
	35	1960		米国ベルシステム　プログラム制御（SPC）電子交換機試用試験（モリス局）
	37	1962	K 課金（Karlsson, 距離別時間差方式）採用	
	38	1963		米国ベルシステム　大局用電子交換機 No.1 ESS 構想発表
	38	1963		ハイゲートウッド局（英）において 4 線式 PAM 交換機の現場試験
	39	1964	アナログ電子交換機 DEX 実用化計画発足（Dendenkosha Electronic eXchange）	
	40	1965		米国ベルシステム　大局用電子交換機 No.1 ESS 商用試験（サカサナ局）
	40	1965	DEX-T1（PCM 方式）の試作（電電公社）	
	41	1966	大容量の C400 形クロスバ交換機試験運用（東京・西大森局）	
	42	1967	大容量の C400 形クロスバ交換機開局（東京・銀座局）	
	42	1967	中容量の C460 形クロスバ交換機開局（水海道局）	
	42	1967	DEX-1 号電子交換機（室内実験用）試験運用開始	
	43	1968		スウェーデン　エリクソン社　市外電子交換機開局（ストックホルム郊外）
	44	1969	DEX-2 号電子交換機（現場試験用）運用開始（東京牛込局）	
	45	1970		米国ベルシステム　中小局用 No.2 ESS 商用試験（オスカウェーゴ局）
	45	1970		ラニオン（仏）において世界で最初の商用 PCM 交換機がサービス開始
	46	1971	DEX-21 号交換機商用試験（東京霞が関局）	
	47	1972	広域時分制本実施	

元号	年	西暦	日本	海外
昭和	47	1972	D10 形電子交換機の商用化（東京銀座、東京淀橋、名古屋広小路、大阪船場）	
	48	1973	No.6 共通線信号方式導入	
	48	1973		スウェーデン　エリクソン社　市内電子交換機開局
	51	1976	中局用 D20 形電子交換機商用化（軽井沢局）	米国ベルシステム 改良 No.1A ESS 導入
	51	1976	遠隔制御形 D10-R1 電子交換機商用化 （名古屋笠寺 等）	
	51	1976		AT&T のディジタル中継交換機　No.4ESS がシカゴにおいてサービス開始
	51	1976	ディジタル交換の本格的研究開始（電電公社）	
	54	1979	全国自動即時化完了	
	54	1979	通話路スイッチに多接点封止形スイッチ SMM 採用 （SMM: Sealed Multi-contact Switch）	
	54	1979	ディジタルデータ交換用 DDX 回線交換サービス（DDX － C）の開始（D50 形回線交換機）	
	55	1980	小局用 D30 形電子交換機商用化（作岡局）	
	55	1980	ディジタル電話交換機 DTS1, DTS2 試作（電電公社）	
	55	1980	ディジタルデータ交換用 DDX パケット通信サービス（DDX － P）の開始（D50 形パケット交換機）	
	57	1982	ディジタル中継交換機　D60 のサービス開始（東京大手町局）	AT&T のディジタル市内交換機　No.5ESS がセネカ局においてサービス開始
	58	1983	ディジタル市内交換機　D70 のサービス開始（青森局、名古屋大同局）	
	60	1985	【日本電信電話株式会社発足】 NTT 民営化	
	60	1985	大容量パケット交換機 D51 のサービス開始	
	62	1987	ステップバイステップ方式終了（相模原・橋本局）	
	63	1988	D70 形 ディジタル市内交換機による ISDN 商用サービス開始	
平成	3	1991	改良 D60 ディジタル交換機の導入開始	
	5	1993	改良 D70 ディジタル交換機の導入開始	
	7	1995	クロスバ交換終了（九州・木城交換所）	
	7	1995	SPC 化（蓄積プログラム制御）完了	
	7	1995	No.7 共通線信号方式導入	
	8	1996	新ノードシステムサービス開始（池袋局）	
	9	1997	交換機ディジタル化完了	
	11	1999	【NTT 再編成】	