

世界をORする視線 (5)

第I部 通信・デジタル技術の発展

(3) 電話機の発明と電話網：その3

住田 潮

1. 手動式電話交換機 [1]

ベルが電話を発明した当時、電話サービスを受けるためには、電話線で繋がれた2台の電話機をリースしなければならず、たとえば自宅と職場を繋ぐといったように、1:1での通話しか行えなかった。電話の発明に触発されて、複数の発信元と複数の受信先を双方向で繋ぐ電話交換機の開発を最初に着想したのは、エジソンの言に拠れば、ハンガリーの発明家ティバダー・プシュカーシュ (Tivadar Puskás [2]) であった。1844年、ハンガリーの貴族社会に生まれたプシュカーシュは法律と工学を学び、イギリスで鉄道建設会社に勤務した後、ハンガリーへ戻り、1873年、ウィーンで世界万国博覧会が開催された折、中央ヨーロッパで初めての旅行代理店を起業した。その後、アメリカのコロラド州へ移り、金鉱開発に取り組む。そこでベルの発明を知り、電話交換機を着想したプシュカーシュは、1877年、エジソンとコンタクトを取り、開発に着手した。電話交換機は、電話交換サービス・センターに設置することにより複数の登録者と接続することを可能にするもので、顧客は電話機を1台購入すれば不特定多数の登録者との通話ができるという利点があった。同年、プシュカーシュのアイデアに基づき、ベル電話会社がボストンで電話交換機の試作に成功する。しかし、最初の商業用電話交換機を設計・開発したのはジョージ・ウィラード・コイ (George Willard Coy [3]) であった。

1877年4月、コイはニューヘブンのオペラ劇場でベルが行った電話機の公開デモンストレーションに出席した。ベルは、この講演で、電話システムをさらに発展させるためには、複数の発信元と複数の受信先を双方向で繋ぐ電話交換機が必要であることに言及した。南

北戦争の退役軍人であり、大西洋太平洋電信会社ニューヘブン支社のマネージャーであったコイは、ベルの講演に興味を抱き、商業用電話交換機の開発に取り組むことを決意する。同年11月、ニューヘブンとミドルセックスに属する郡を対象とするフランチャイズ契約をベル電話会社と結んだコイは、2人の投資家の支援を得て、翌1878年1月、ニューヘブン地域電話会社を設立、本格的な商業用電話交換機を導入し、電話サービスを開始した。

コイの交換機は、通常配電される電力で機能し、1m×60cmの木製の板の基部に交換手が使用していないときに電話機を置く棚を付け、上部には八つの接続盤を円周に配置したリングを4個並べ、それぞれのリングの中央には金属製のアームが取り付けられているという簡単な構造で、システムへの投資総額は40ドル以下であったという。リング上の接続盤は顧客の電話に繋がっており、中央の金属製アームと接続することが可能であった。また、リング間もオン・オフのスイッチを操作して、接続を制御することができるようになっていた。

まず、発信者が交換手に電話して相手先の番号を告げると、交換手がリング間の接続スイッチと金属製アームを動かして該当する受信先に接続するという仕組みであった。最大 $8 \times 4 \times 2 = 64$ 人の顧客を繋ぐことが可能であったが、それぞれの会話を成立させるためには6段階の接続が必要であり、同時に会話することができるのは、たかだか2組4人であった。サービス料は月額1.5ドルで、設立当初に登録した顧客は24名に過ぎなかったが、僅か1ヶ月後、世界で初めての電話帳を出版したときには、顧客は50名に倍増していた。多くは、医者、警察署や郵便局に所属する人々で、住民は11名、内4名は会社関係者であった。その後、ニューヘブン地域電話会社は急成長を遂げ、1880年までにコネチカット州全体とマサチューセッツ州の

すみた うしお

筑波大学名誉教授

〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

西部を任せられるまでになり、1882年、南部ニューイングランド電話会社と社名を変更した。

この手動式電話交換機を導入した電話交換サービス・センターは、その後、工夫を重ねて急速に発展し、全米電話網の確立を促す原動力となった。加入者の電話回線の終端となるジャックを数百も並べた垂直盤の前に交換手を配置し、交換手の電話ともう一方の端に取り付けられたプラグを繋ぐ、応答コードと呼び出しコードの2本が用意された。発信者が自分の電話を取ると、局所的なループ電流により、まず、その電話に対応するジャック近くのランプが点灯する。交換手は応答コードのプラグをそのジャックに差し込み、聞き取りキーを作動させ、ヘッドセットを通して「何番にお掛けですか？」と尋ねる。番号を聞くと、呼び出しコードのプラグを受信先のプラグに繋ぎ、呼び出しキーを作動させると呼び出し音が発生する。しかし、発信側には受信側の呼び出し音は聞こえず、電話が繋がるまで、一定の時間間隔で、交換手が「ただいまお呼び出ししております」と繰り返し話し掛け、受信先が電話を取り上げると会話が始まるという仕組みであった(図1)。

加入者が増え、1人の交換手で対応できなくなると、同じサービス・センターの中で、交換手同士を繋ぐ中継回線が導入され、物理的に離れたジャックを繋げるようにした。長距離電話の場合は、サービス・センター同士を繋ぐ回線が準備され、交換手の間でのやり取りを通して通信回線を確保することが可能となった。

当時の電話交換サービス・センターは、交換手がプラグを繋ぐことに加え、聞き取りキーと呼び出しキーを作動させなくてはならず、さらに一つの会話が終わるまで交換手はその回線に束縛され、ほかの受信を処理できないという点で、極めて非効率であった。

1910年代から1920年代に入ると、電話交換機の技術革新が進み、交換手が応答コードのプラグを発信電話のジャックに差し込むと自動的に応答システムが作動し、次いで発信者が告げる相手先電話番号のジャックに呼び出しコードを挿入すると、呼び出し音が発信・受信、双方の側に同時に感知される仕組みが開発された。交換手は聞き取りキーと呼び出しキーを作動させる負担から解放されると同時に、繋いでしまえば当該回線に関与する必要がなくなったため、ほかの受信を受け付けることができるようになった。

一方、複数のサービス・センターを介在させて通話回線を確保する長距離電話では、関係するすべてのセンターで同時に関連する回線が空き状態である必要があり、効率化することは極めて困難であった。1918年

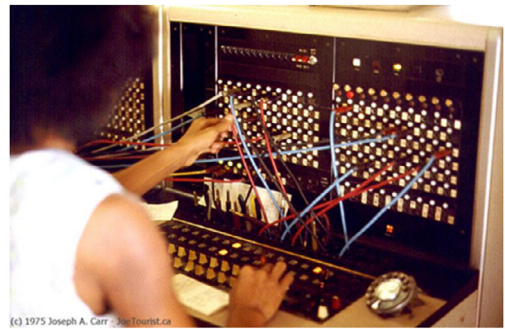


図1 電話交換手
By Joseph A. Carr: <http://www.JoeTourist.net/>,
Attribution, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=5169771>



図2 初期の電話線

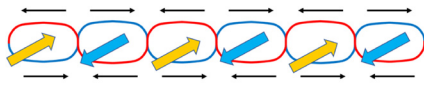
当時、二つのサービス・センターを繋ぐ長距離電話の回線接続を完了するのに要する時間は、平均して15分程度であった。世界情勢が不安定化し、軍事通信を絶対的に優先する必要のあった1943年には、アメリカ東海岸から西海岸へ長距離電話を繋ぐには、2時間も掛かることが珍しくはなかった。

2. 電話線の構造

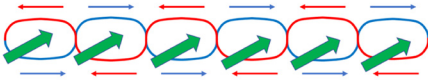
初期の電話線は、図2に示すように、周りをポリエチレンやポリ塩化ビニルなどの絶縁体で覆われた2本の銅線から構成される真っ直ぐな電線であった。

2本の銅線は同量で逆向きの信号を伝え、1本の銅線は基準電圧(大地の電圧で0V)を維持し、もう1本の銅線が信号電圧(送信される電波の電圧)を伝える。この2本の銅線の電圧差を測定することにより、送信される電波が受信先で復元されることになる。この方式は、差動モード(differential mode)転送と呼ばれる。波の1秒間当たりの振動回数はHz(ヘルツ)で表され、人間の可聴域は、20Hzから20kHzである。この事実より、電話網の周波数域は、3kHzを標準として、400Hzから3.4kHzの範囲で送受信できるように設計された。

真っ直ぐな電線を用いた通常の差動モードによる転送において、外部にノイズ源があると、磁界による結合によってノイズ信号が導入される。ノイズ源が2本の銅線と等距離にあれば、両方の銅線に同等のノイズ信号を導入するので、受信側で2本の銅線の電圧差を測定する際にキャンセルされ、通信品質に影響を与えない



撚り対線の機能性 (1) : 外部へノイズを出さない



撚り対線の機能性 (2) : 外部のノイズに影響されない

図3 撚り対線の機能性

い。これが、電線 2 本を用いて通信が行われた理由である。しかし、ノイズ源が一方の銅線に近いとき、近い方の銅線がノイズ信号により強く結合し、2 本の銅線の電圧差に大きな影響を及ぼすことになり、通信品質の劣化をもたらす要因となった。

電力の供給がより一般的になると、電柱の横木を通して張り巡らされる送配電線と電話線は経路を共有するようになり、送配電線の発するノイズによる通信品質の劣化は、深刻な問題となった。初期的な対策としては、電柱の何本かに 1 回、基準電圧と信号電圧を送る 2 本のワイヤーの位置を入れ替えるワイヤー位置交換 (wire transposition) という手法が開発された。キロメートル当たり 4 回の入れ替えを行うことによって 2 本の銅線はほぼ同等のノイズを受けるようになり、通信品質は改善された。

1881 年、アレクサンダー・グラハム・ベルは、このワイヤー位置交換の考え方をさらに進め、撚り対線 (twisted pair cable) を開発した [4]。撚り対線は、絶縁された 2 本の銅線を撚り合わせたもので、それ自体が外部へノイズを出しにくいという特徴と、外部からのノイズの影響を受けにくいという特徴を合わせもつ。

図 3 の上側は、撚り対線を通る信号電流によって発生する磁束 (斜め上向き of 太い矢印と、斜め下向き of 太い矢印) が、隣同士で反転して互いに打ち消し合い、伝送する信号によるノイズを外部に出しにくい事実を示した概念図である。一方、図 3 の下側は、外部から撚り対線を貫通する磁束 (斜め上向き of 太い矢印) によって発生する電流の向き (2 方向の細い矢印) が隣同士で反転し打ち消し合うので、伝送する信号は外部からの影響を受けにくい様子を模している。1900 年までには、アメリカの電話網は、撚り対線かワイヤー位置交換によるノイズ除去対策が施されるようになった。

1 本のケーブルの内部に複数の撚り対線が敷設される場合、メートル当たりの撚り数を表すツイスト率を同じにすると、別々のペア同士の間で、同じ導線が繰

り返し隣り合うようになるので、差動モードの利点が失われる。この理由で、同じケーブル内の撚り対線のツイスト率は、異なるように設定された。現在でも、撚り対線で構成されるケーブルは LAN (Local Area Network) などで用いられており、ツイスト率の構成は、そうしたケーブルの主要な仕様となっている。

3. 電話交換機の自動化

交換手を必要としない電話交換機の自動化を最初に実現したのは、アメリカの発明家アルモン・ブラウン・ストロージャー (Almon Brown Strowger) [5] である。

1839 年、ニューヨーク州のペンフィールドに生まれたストロージャーは、故郷で教師生活を送った後、志願兵としてニューヨーク州騎馬隊に参加して南北戦争を戦った。終戦後、教師生活に戻ったものの、直ぐに葬儀屋に転職、アメリカ各地を渡り歩いた後、最終的にカンザスシティーに落ち着いた。

当時は、西部開拓時代の真っ最中であり、街の中心は酒場で、電話交換サービス・センターもそこに置かれていた。拳銃での決闘も珍しくはなく、その結果、死者が出るたびに交換手が電話で葬儀屋を呼び、遺体の処理をしたうえで葬儀を出すという具合であった。ある時期を境に、葬儀の依頼が激減し始めたことに気付いたストロージャーは、その理由の調査に乗り出し、電話交換手が競争相手の葬儀屋の妻であり、ストロージャー宛ての葬儀依頼の電話をすべて自分の夫に繋いでいた事実を発見する。交換手の恣意的な判断がビジネスを左右してしまうような電話交換サービスの有り様に憤ったストロージャーは、電話交換機の自動化に挑戦する決意をする。これは、技術革新の法則 (2) プロセス自動化法則 (連載 No. 2) と技術革新の法則 (7) 目的意識性 vs. 偶発性の目的意識性 (連載 No. 4) の内容をもつ技術革新であった。

1889 年、ストロージャーが開発した自動電話交換機は、2 軸をもつステッピング・スイッチ (Stepping Switch) と呼ばれるもので、これを 2 連結した概念図を図 4 に示す。

10×10 の接続盤を半円形に二つ並べ、それぞれに金属アームのついた 2 本の金属棒が用意されている。金属棒は、垂直方向へ上下に動き、水平方向へ回転することができ、それぞれの位置が定まった後に、2 本の金属棒は接続される。発信者が 2358 をダイヤルしたとすると、最初の金属棒に取り付けられた金属アームが発信側の電話に接続され、2 本目の金属棒が垂直方向に動いて 2 の水準で止まる。次いで、水平方向に回転し、

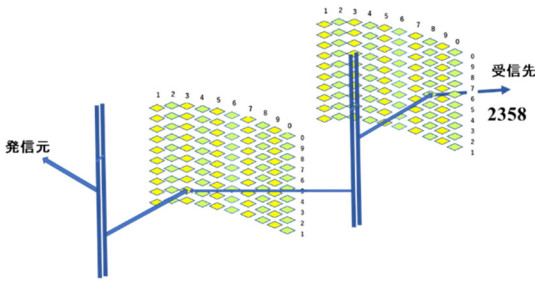


図4 2 連結されたストロージャー・スイッチの概念図

(2, 3) (高さ 2, 円周上 3 の位置) にある接触盤に接続して動きを止め, 2 本の金属棒は接続される. 3 本目の金属棒のアームが同様の動きで (2, 3) に接続し, 4 番目の金属棒のアームが (5, 8) への接続を行い, 2358 に繋がる通信回路が構成されることになる. これにより, 1 台の電話から交換手抜きで $100 \times 100 = 10,000$ 台の電話に自動的に接続することが可能となる.

1891 年, ストロージャーは自動電話交換機に関する特許を取得し, 翌年, 甥のウィリアムと数人の仲間と The Strowger Automatic Telephone Exchange Company を設立, 当時の住居のあったインディアナ州のラボルテで, 最大 99 人を登録できる自動交換機を設置し, 75 人の登録者を得て電話サービスの営業を開始した. しかし, ストロージャーの意に反して, ストロージャー・スイッチは直ぐには普及しなかった.

当時, ベルの経営する AT&T は “One System One Policy Universal Service” を掲げ, 研究開発 (ベル電話会社) から機材製造 (ウェスタン・エレクトリック社) までの「垂直統合」と, 市内交換から長距離交換までの電話サービス (ベル・システム) の「水平統合」を同時展開し, 独占状態を誇っていた. 技術革新の法則 (4) ネットワーク外延性の法則: Type II 市場 (連載 No. 3) を, 文字どおり謳歌していたのである. 特に, 電話交換サービス・センターの交換手のほとんどは女性であり, 当時としては未だ珍しかった大規模な女性の職場を提供していることに, AT&T は誇りをもっていた. ストロージャー・スイッチの導入は, この女性の職場を消滅させてしまうことを意味し, AT&T は意を払わなかったのである.

間もなくしてストロージャーはビジネスに興味を失い, 1896 年に彼の特許を仲間に 1,000 ドルで売却し, 1898 年には自分の持ち株も 1 万ドルで手放してしまう. 残された仲間たちは, ストロージャー・スイッチの改良を重ね, 自分たちの名前で特許も取得している. 電話ビジネスを離れたストロージャーは, フロリダに

移住し, 再び葬儀屋を始めた. 1902 年, そこそこの財産を遺して 63 歳で世を去り, 葬儀ビジネスのパートナーであった墓地に葬られた.

ストロージャー・スイッチは, 技術革新の法則 (2) プロセス自動化法則 (連載 No. 2) に適った技術革新であり, やがて時代の波は彼の発明に追い付くことになる. 実際, 1916 年になって, ベル・システムは, ストロージャー・スイッチの特許を 2.5 百万ドルで購入した. 20 年前, ストロージャーが彼の特許を仲間に売却した際に比べ, 実に 2,500 倍の値が付いたことになる. 因みに, 今日, 世界中の電話番号の多くが下 4 桁で構成されているのは, 2 連結された当初のストロージャー・スイッチの仕組みの名残である.

日本で電話交換サービス [6] が始まったのは 1890 年 (明治 23 年) で, 交換手は東京で 11 人, 横浜に 4 人だけであった. しかし, 導入後は急成長を遂げ, 1900 年 (明治 33 年) には, 東京だけで女性 330 人, 男性 100 人が交換手として勤務するようになった. 1921 年頃には, 電話の加入者が増加して交換機の高さがだんだん高くなり, 背の低い交換手は交換機が一番上まで手が届かず, 特注の高くした下駄を履いて仕事をしたという逸話が残されている. 日本で電話交換機が自動化されたのは 1926 年 (大正 15 年) で, まず, 東京と横浜で自動交換機が導入され, その後, 大きな都市から次第に自動化が普及していった.

4. 真空管と増幅器 [7]

電話サービス市場を, 技術革新の法則 (4) ネットワーク外延性の法則 (連載 No. 3) で述べた Type 0 から Type I, さらに Type II へと発展させる推進力となったのが, ストロージャー・スイッチに始まる電話交換機の自動化であったことを見てきた. しかし, これに加えて重要な役割を果たした技術革新が, 中継器 (repeater) の開発である.

波は, 振幅 (音波で言えば音の大きさ), 振動数 (音波で言えば音の高さ), 波形 (音波で言えば音色) の 3 要素で特徴付けられる. 電話機で発生される音波が, 3 要素の同じ特徴をもつ電波に変換され, 導線を通じて送信される際, 主として導線の抵抗に因る発熱作用から生じるエネルギー・ロスにより, 減衰 (attenuation) が起こる. 長距離通信において, この通信劣化を防ぐ目的で開発されたのが中継器である. 中継器は, 受信したアナログ波の振幅を回復させる機能を果たし, その心臓部は増幅器 (amplifier) である.

1904 年, エジソン効果に着目し, 交流を直流に整流

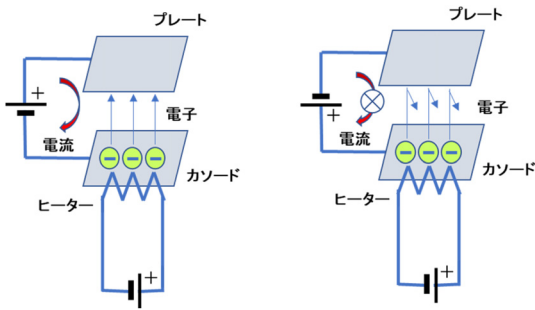


図5 2極真空管の原理 (文献 [8] を参考に著者作成)

する目的で2極真空管を発明したのは、イギリスの科学者ジョン・フレミングである (連載 No. 4)。真空管とは、内部を真空にして電極を封入した管球であり、それが整流機能を果たす原理を図5に示す [8]。実物では、カソードとプレートはヒーターを包み込むような円筒形をしているが、ここでは、理解を容易にするため平面上で表している。

真空中で物質を高温に熱すると、物質内の電子が熱エネルギーを得て、その物質の表面より電子が放出される現象を熱電子放射現象と呼ぶが、2極真空管もこの原理を応用している。図5左側に示すように、プレートと呼ばれる金属板にプラス、カソードと呼ばれる金属板にマイナスの電圧を加え、ヒーターでカソードを加熱すると、ヒーターの表面から熱電子が放射される。電子はマイナスの電荷をもっているため、プラス側のプレートに向かって移動し、その結果、プレートからカソードに向かって電流が流れる。ここで、図5右側に示すように、プレートとカソードに加わる電圧の極性を逆にすると、放射されたマイナスの電子は、同じマイナスの電気が加えられているプレートに弾き返され、電流は流れなくなる。したがって、プレートがプラス、カソードがマイナスのときだけ電流が流れ、交流から直流を取り出す整流器の機能を取り出すことが可能となる。

この2極真空管のカソードとプレートの上にグリッドと呼ばれる粗い網状の電極を配置し、増幅器として機能する3極真空管を発明したのは、アメリカの発明家、リー・ド・フォレスト (Lee De Forest) [9] である。電子楽器やフォノフィルム (映画のサウンド・オン・フィルム方式) なども発明し、また、ラジオの先駆者でもあったフォレストは、電子工学の発展に寄与したことから、エレクトロニクス時代の父の1人に数えられている。3極真空管の原理を図6に示す [8]。

2極真空管の場合と同様、プレートにプラス、カソ

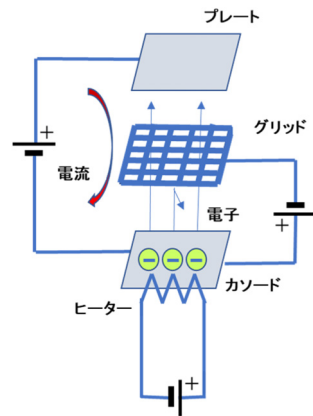


図6 3極真空管の原理 (文献 [8] を参考に著者作成)



図7 捩り対線と中継器で構成される電話網の概念図

ドにマイナスの電圧、またグリッドにもマイナスの電圧を加えると、ヒーターで加熱されたカソードから放射される電子はグリッドによって弾き返されるが、一部の電子はグリッドをすり抜けプレートに到達するので、プレートからカソードに向かって少しか電流が流れることになる。1906年、フォレストは、グリッドとカソードに加える電圧を僅かに変化させると (入力信号)、プレートからカソードに流れる電流 (出力信号) が大きく変化することを発見し、3極真空管を増幅器として機能させることに成功した。この発明により、遠距離電話の通信品質が格段に改良され、電話サービス市場の拡大に拍車がかかった。

5. 電話網設置の最初の最適化問題

増幅器を内蔵する中継器を本格的に導入した電話網の設置は、ニューヨーク市から始まった。その概念図を図7に示す。

この事業に携わった技術者が最初に直面した問題は、電線の直径と中継器間の距離に関する最適化問題であった。太い銅線を用いると、送電効率が上がり、単位当たりの送電距離に対するエネルギー・ロスが小さくなるので、一定の通信品質を守るために必要となる中継器間の距離を広げることができる。これにより、電話網に必要な中継器の数が少なくて済み、中継器に掛かるコストを削減できるが、銅線のコストは高くなる。逆に、細い電線を採用すると、銅線に掛かるコストは安くなるが、一定の通信品質を守るためには中継

器間の距離を縮めなければならず、より多くの中継器が必要となり、中継器に掛かるコストが増大する。ここで、銅線の直径と中継器間の距離の最適な組み合わせは何か、という問題に直面することになる。

実は、当時の技術者は、この最適化問題のもう一步先を見ていた。中継器はハードウェアであり、当然、保全作業が必要となるので、保全費用までも考慮して、問題に対処したのである。電話網は、ニューヨーク市では地下に埋設されるので、保全の度に掘り起こしていたのでは費用が掛かって仕方がない。そこで、中継器をマンホールの下に置けば保全作業が容易になることを思い付き、中継器間の距離をマンホール間の距離と定めた。次いで、400 Hz から 3.4 kHz の範囲で送受信する際の通信品質を一定の水準で保証するという制約条件の下に、銅線の直径を最小化することによって問題を解決したのである。

アナログ電話網は、ニューヨーク市から全米へ、そしてデジタル電話網へと、技術革新の法則 (5) 整合的転移 (連載 No. 4) に従って発展を遂げたので、今日のデジタル電話網のさまざまな技術標準には、未だニューヨーク市のマンホールの距離の影響が波及している。

6. 自動電話交換機の変遷 [10]

ストロージャーの発明による 2 軸ステッピング・スイッチをさらに発展させた自動電話交換機の導入により、市内通話に関しては電話が自動的に繋がるようになった。しかし、市外通話ともなれば、各地にある自動交換機を交換手のリレーによって接続するという状態が長く続いた。また、当時のステッピング・スイッチはメンテナンスが難しく、寿命も短いという難点を抱えていた。

1920 年代に入って、これらの難題を解決すべく登場したのがクロスバー・スイッチ (Crossbar Switch) である。その概念的構造を図 8 に示す。

縦方向に並行した複数の通信路と横方向の同様な通信路の交点にスイッチが設けられ、相手先の番号を回

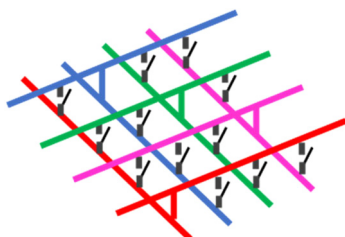


図 8 クロスバー・スイッチの概念図

すと、各バーに付いている電磁石の磁力によってスイッチが作動し、縦と横のバーが接触することによって、相手先の電話に自動的に繋がるという仕組みとなっている。言葉を替えると、これらのスイッチ群を制御することで、電話接続に必要な専有経路を動的に構築する構造を実現した。このクロスバー・スイッチの導入により、各地の自動交換機をいくつも経由するという機能が全自動化された。市外通話の際に交換手が手動で相手の回線に繋げる必要がなくなり、また、全自動により、市外通話の接続時間も大幅に短縮され、交換手がいなくても市外通話を掛けた際に掛かった電話料金の自動記録も可能となった。

電話網が拡大発展するに連れて、クロスバー・スイッチは階層的に整備されるようになった。加入者の電話線を直接接続し、回線交換を制御する LS (Local Switch) が交換網の最下層に位置する。一つの LS はその地域にある多くの加入者を収容しており、その地域内の相互通話は LS のみで可能であるが、別の LS に収容されている加入者と通話するには、LS 間の接続が必要となる。必要に応じて LS 間の接続を取りもつのが TS (Toll Switch) である。さらに上位で、交換網と交換網を接続するのが GS (Gateway Switch) で、TS 機能をもつと同時に、信号交換の機能を併せもつことが一般的である。また、大手企業などで、無料で内線電話網を管理すると同時に、外部電話網への接続を仲介する PBX (Private Branch Exchange) も普及するようになった。

7. 技術革新の法則 (8) 連続処理から並行処理へ

技術革新が既存機能の慣性力の範囲内で進むとき、一般的に連続処理を並行処理に変換する方向で開発が進む。これを、技術革新の法則 (8) として纏めておく。

技術革新の法則 (8) 連続処理から並行処理への転換：技術革新が既存機能の慣性力の範囲内で進むとき、連続的に処理されていた機能を並行処理へと変換する推進力が働く

前述した、電話交換機における自動応答システムの開発は、繋いでしまえば交換手が当該回線に関与する必要がなくなり、ほかの受信を受け付けることができるようになった点で、この法則に沿った開発の典型例である。また、1 組の 2 軸が一つの通話回線に縛られるストロージャー・スイッチに比し、複数通話回線の

同時進行を効率的に許容するクロスバー・スイッチの開発も同様である。ICT の技術革新においては、技術革新の法則 (8) が大きな推進力となっていることを、今後、繰り返し見ていくことになる。

参考文献

- [1] Wikipedia, Telephone exchange, https://en.wikipedia.org/wiki/Telephone_exchange (2020 年 11 月 15 日閲覧)
- [2] Wikipedia, Tivadar Puskás, https://en.wikipedia.org/wiki/Tivadar_Puskás (2020 年 11 月 15 日閲覧)
- [3] Uconn Library, December 2011 Item of the Month: The switchboard that launched the first public telephone company in the world <https://blogs.lib.uconn.edu/archives/tag/george-coy/> (2020 年 11 月 15 日閲覧)
- [4] Wikipedia, ツイストペアケーブル, <https://ja.wikipedia.org/wiki/ツイストペアケーブル> (2020 年 11 月 15 日閲覧)
- [5] Wikipedia, Almon Brown Strowger, https://en.wikipedia.org/wiki/Almon_Brown_Strowger (2020 年 11 月 15 日閲覧)
- [6] 日立製作所, 「電話機・交換機の歴史」, https://www.hitachi.co.jp/kids/kinopon/kinopontown/download/detail_i01.pdf (2020 年 11 月 15 日閲覧)
- [7] Wikipedia, 真空管, <https://ja.wikipedia.org/wiki/真空管> (2020 年 11 月 15 日閲覧)
- [8] Watacchi World, 「電波ってなあに?」, <https://www.watacchi.com/denpa/index.html> (2020 年 11 月 15 日閲覧)
- [9] Wikipedia, リー・ド・フォレスト, <https://ja.wikipedia.org/wiki/リー・ド・フォレスト> (2020 年 11 月 15 日閲覧)
- [10] Wikipedia, 電話交換機, <https://ja.wikipedia.org/wiki/電話交換機> (2020 年 11 月 15 日閲覧)