

Time Sharing System の進化と独インダストリー4.0 構想

高橋 信一 (岐阜協立大学経営学部)

キーワード: Time Sharing System, CAD/CAM, クラウド, インダストリー4.0, オープンソース

1. はじめに

ドイツはインダストリー4.0 構想を掲げ、その柱として IoT 化された製造システムと連結する情報システムのサイバー・フィジカル・システム (Cyber-Physical System: CPS) 実装、すなわちインダストリー4.0 情報システムの実現を目標として掲げた。このドイツのインダストリー4.0 構想は世界に影響を与え、日本においてもインダストリー4.0 構想がブームになっている。情報システムの CPS 実装はビッグデータの AI による処理を前提に、したがってクラウド型システムの利用を前提にして初めて実現できるものである。

このクラウド型システムの利用を前提にした CPS 実装されたインダストリー4.0 情報システムをコンピュータ・システム及び情報システムの進化における歴史的な特徴を明らかにし、さらにそのことによってインダストリー4.0 情報システムの本質を明らかにすることが本論文の課題である。これまでコンピュータ・システムの歴史研究は様々なコンピュータ・メーカーが開発する様々なコンピュータ本体の特徴や競争状況は分析し紹介はするが、コンピュータ本体の利用形態との関連で、適切な入力装置や出力装置、およびネットワーク化装置を含めたコンピュータ・システムの歴史として、またアプリケーション・プログラムとの関連をふまえた情報システム (正確な表現としては情報処理システム) の歴史として分析してこなかった。情報システムの歴史的な分析は企業におけるコンピュータ・システムの利用形態やアプリケーション・プログラムとの関連をふまえたコンピュータ・システムの歴史的進化の過程の分析が必要である。その進化の過程を分析するためには、様々なコンピュータ・メーカーが開発し市場競争する様々なコンピュータ機種の特徴をただ時系列的に紹介することではなく、コンピュータ・システムの適切な時代区分と、その時代においてドミナントなコンピュータ・メーカーのドミナントなコンピュータ・システムの分析に焦点を絞ることが重要である。筆者はクラウド型システムまでのコンピュータ・システムの開発の歴史、進化の歴史を分析し、この歴史は MIT サーボ機構研究所において開発された Whirlwind を起点として、メインフレーム・システムから、クライアント/サーバー型システム、そしてクラウド型システムへ進化する Time Sharing System の進化であったこと、そしてこのクラウド型システムを基礎に追求されるドイツのインダストリー4.0 情報システム (CPS の実装) は ARPA (DARPA) の IPTO 初代室長であった J・C・R・リックライダー (Joseph Carl Robnett Licklider) が追求した「人間とコンピュータの共生」の実現であったことを本論文において明らかにする。リックライダーは論文「Man-Computer Symbiosis (人間とコンピュータの共生)」において「人間とコンピュータの共生は、人間と電子的コンピュータとの間の協調的相互作用において期待される発展である。それは人間と電子的メンバーとの間のパートナーシップの非常に緊密な結合を含む。主な目的は、1) 定式化された課題の解決を容易にするため、コンピュータが定式化された思考を促進できるようにすること、および2) 所定のプログラムに柔軟に依存することなく、人間とコンピュータが意思決定と複雑な状況の制御に協力できるようにすることである。…。その効果的な共同組合が

達成される前提条件には、コンピュータの Time Sharing、メモリー部品、メモリー構成、プログラミング言語、および入出力機器における発展が含まれる」と述べた。リックライダーはめざす人間とコンピュータの共生に必要な Time Sharing System の進化に欠かせない要素としてメモリー装置、プログラミング言語、そして入出力機器（ペン入力装置や CRT ディスプレイなど）の発展を望んだこと、そしてさらに注目すべきは、そのリックライダーが AI の活用やコンピュータグラフィックスの発展も望み、彼によって ARPA 内に創設された IPTO (Information Processing Techniques Office) を通じて、彼が初代室長として、またいずれも同じ MIT リンカーン研究所出身のアイバン・サザランド (Ivan E. Sutherland) が 2 代目室長として、ロバート・テイラー (Robert W. Taylor) が 3 代目室長して、ローレンス・ロバーツ (Lawrence G. Roberts) が 4 代目室長として各拠点大学に Time Sharing System 研究関連で膨大な研究プロジェクト資金を提供し続け、Time Sharing System の進歩を支援したことである。

Time Sharing System という用語やその概念は SAGE プロジェクトの役割を終えた Whirlwind が MIT のキャンパスに設置されプログラミング作業を伴う研究者たちに利用される中で使われていたものであった。しかしながら 1950 年代後半にバッチ処理コンピュータの効率的利用のアプローチから、MIT 出身で IBM 701 の主任設計者となったナサニエル・ロチェスター (Nathaniel Rochester) によって開発され、バッチ処理コンピュータに導入された多重プログラミング (Multiprogramming) と混同されるようになった。のちには Time Sharing System にも多重プログラミングの技法が組み込まれて多数端末による同時処理が可能になるや、そのことが Time Sharing System 概念の通説理解となった。多重プログラミングはバッチ処理コンピュータにおいて複数のプログラムを同時に処理するためのものであり、複数のプログラムの処理を瞬時に切り替えながらほぼ同時に処理することができる。とは言え、プログラミング作業を伴う研究者たちは特にデバッグ作業の苦痛を嫌がり、バッチ処理コンピュータよりは Time Sharing System の利用の方を好んだ。Time Sharing System の核心となる意味は適切なディスプレイ装置とグラフィック・インターフェイスを伴って「インタラクティブ (対話的) にリアルタイム処理される」ことであり、当時主流であったバッチ処理コンピュータ (出力装置はパンチカードシステム) に対置されるものであったが、Time Sharing System 研究の促進を図った IPTO は Time Sharing System の利用効率の面から、多数の端末 (入力装置とディスプレイ装置のセット) による同時利用を追求した。MIT リンカーン研究所で Time Sharing System 研究を行い、後に赴任したダートマス大学において AI 研究分野で有名になるジョン・マッカーシー (John McCarthy) は Time Sharing System の概念を拡張してコンピュータのインタラクティブでリアルタイム処理の利用を 1 人のプログラマによる利用から複数のプログラマによる同時利用を可能にするよう提案を行い、MAC プロジェクトの一環としてコルバト (Corbato) のチームが取り組む CTSS (Compatible Time-Sharing System) プロジェクトにも影響を与えた。CTSS 化によって MIT の計算センターにあったバッチ処理コンピュータ (IBM 7094) を切り替えて一時的に Time Sharing System として利用できるように改良した際には、3 人の利用者が同時に利用できるようになった。またジョン・マッカーシーが赴任した後のダートマス大学では、彼の提案と ARPA からの研究プロジェクト資金によって、GE 215 を使って Time Sharing System を開発するプロジェクトが開始され、完成してキャンパスで稼働を始めたダートマス・システムにおいては、40 人の同時利用が可能であり、GE 社はこれを基に 1964 年 9 月に Time Sharing System の商用サービス化を開始した¹⁾。

Time Sharing System としてのコンピュータの進化の方向に特に大きな影響を与えたのは米国における ARPA の IPTO を通じた政府からの膨大な研究開発資金の提供であり、そのことによってさらに歴史的に重要な特性を付与させることになった。すなわち Time Sharing System のソフトウェア面においては単に標準化・オープン化に留まらず、フリーソフトウェア運動とオープンソース運動を媒介に共有化が主流とな

り、そのことによって Time Sharing System の今日的な形態であるクラウド型システムが実現した。そのようなクラウド型システムを前提にして、ドイツにおいてはサイバー・フィジカル・システムの実装を柱とするインダストリー4.0 情報システムの実現に向けた構想が提起されることになった。以上の進化の過程を本論において明らかにしよう。

2. Whirlwind の誕生

2.1 要素の誕生

(1) 二極真空管および三極真空管の誕生

エジソンが 1883 年に自身が発明した白熱電球の内部が黒く汚れて暗くなるのに困ってフィラメントの近くに金属板を入れて特許を取り、これが二極真空管の基になった。これを 1904 年に無線に応用して二極真空管としたのがマルコーニ無線電信会社の顧問となっていたジョン・フレミングである。マルコーニの発明した無線電信に興味を持ったリー・ド・フォレストがイリノイ工科大学の前身の 1 つであった研究機関 (Armour Institute of Technology) で研究員として働き、無線、燃焼ガスと放電の関係、電波検出器などを研究した。彼はまずジョン・フレミングが 1904 年に発明した二極管「フレミング管」に工夫を加えて電波検出器として機能する二極管 (いわゆる検波管) を発明し、1907 年に特許を出願し 1908 年 2 月に特許 (米国特許番号第 879, 532 号) を取得した。さらにリー・ド・フォレストは 1910 年にサンフランシスコに移り住み、パロアルトにあった連邦通信社 (Federal Telegraph Company) の研究所で働き始め、無線送受信機の電波増幅に使用する真空管を開発する研究を進め、3 つの電極を持つ、オーディオン管と呼ばれる三極真空管を発明し、1912 年に特許を取得した。二極管のカソード (フィラメント) とアノード (プレート) の間に第三の電極であるグリッドを挿入したものであり、ラジオ用信号の増幅に使うことが可能であり、これが世界最初の三極管とみなされている。リー・ド・フォレストはこのオーディオン管の特許を AT&T 社にも売り込んでいた。

AT&T 社は米国の東海岸から西海岸へとつながる長距離電話網の施設を考え、弱くなった電話信号を途中で増幅する装置の開発が必要であり、信号増幅機能を持つリー・ド・フォレストのオーディオン管を改良した三極真空管の利用が有望と見たからであった。AT&T 社の子会社で製造部門を担っていた WE (Western Electric) 社は AT&T 社が使う通信設備の製造を一手に引き受けていたが、AT&T 社の技術部門が開発した三極真空管とそれを利用した信号増幅装置を大量製造し、大陸横断長距離電話網の施設を支えた。1925 年 1 月には AT&T 社と WE 社の折半出資によってベル電話研究所が新しく設立され、通信設備、三極真空管、信号増幅装置などの開発・改良を担い、WE 社が製造を担うことになった。

三極真空管を使った信号増幅装置は膨大な製造コストと電力消費コストを要するだけでなく、三極真空管は発生する熱によって故障しやすいという致命的な欠点を持っていた。ベル電話研究所に雇われた 3 人の科学者、ウィリアム・ショックレー (William B. Shockley Jr.)、ジョン・バーディン (John Bardeen)、ウォルター・ブラッティン (Walter H. Brattain) は真空管に替わる手段として半導体に着目した研究を行い、ジョン・バーディンとウォルター・ブラッティンが 1947 年 12 月に点接触型トランジスタを発明し、ウィリアム・ショックレーが 1949 年 4 月に接合型トランジスタを発明し、真空管式デジタルコンピュータからトランジスタ式デジタルコンピュータへの転換に必要な要素を誕生させた。

(2) アイオワ州立大学の ABC とペンシルヴェニア大学の ENIAC

1939 年に数学計算への利用を目的に、アイオワ州立大学の研究室の中で、数学の専門家ジョン・V・アタ

ナソフ (John V. Atanasoff) 准教授が大学院生の研究助手クリフォード・E・ベリー (Clifford E. Berry) の協力を得て、真空管を使った世界初のデジタルコンピュータ ABC (Atanasoff Berry Computer) の実験に成功し、真空管式コンピュータの実現性を示した。この ABC の話をアタナソフから直接聞いて興味を持ったジョン・モークリー (John W. Mauchly) はアイオワ州立大学を訪問し ABC を見学してその仕組みを聞いた上で、その後教授として就任したペンシルヴェニア大学ムーア校において真空管式コンピュータの開発に取り組むことになった。MIT 電気工学部のヴァネヴァー・ブッシュ (Vannevar Bush) が微分解析機 (Differential Analyzer) と呼ばれるアナログコンピュータを 1925 年、1927 年、1931 年のそれぞれ 3 台完成させたことが影響して、MIT だけでなく、ペンシルヴェニア大学ムーア校、米国陸軍兵器局弾道研究所 (以下、通称のアバディーン弾道研究所と表記)、GE 社の 3 カ所でも微分解析機が構築され活用されていた。

アバディーン弾道研究所は所有する微分解析機を使って新規に製造される大砲の射撃照準合わせに欠かせない射撃表を作成していたが、日米開戦とともに新規大砲の需要が急増し、射撃表作成が間に合わず、より優れた微分解析機を所持していたペンシルヴェニア大学ムーア校に射撃表作成を委託した。しかしそれでも間に合わないことが判明し、ペンシルヴェニア大学ムーア校のジョン・モークリーがアバディーン弾道研究所に提案し、開発資金を得て講師のジョン・プレスパー・エッカート (John Presper Eckert Jr.) とともに実用的なデジタルコンピュータ ENIAC を開発するプロジェクトを開始することになった。ENIAC は戦争利用に間に合わせるために開発を急ぐ事情から、計算用プログラムを保存する記憶装置を組み込まず、コードのプラグ接続自体が計算用プログラムを成す射撃表作成に特化した専用機として 1945 年に完成させた。ただしモークリーとエッカートはその完成以前にそのような記憶装置を組み込む必要性は認識し、ENIAC 完成後に取り組む予定であり、エッカートが開発のアイデアももっていた。ENIAC プロジェクトが始まる以前に、エッカートは陸軍からの依頼により、物体に当たって跳ね返るレーダー信号を 100 分の 1 マイクロ秒単位で計測できる装置の開発に取り組み、レーダーのパルスが水銀を満たしたタンク内を通るようにしたうえで電子的な方法で何度も繰り返えさせる装置、すなわち記憶装置に利用できる水銀槽遅延線の原型を既に開発していた²。

モークリーとエッカートは水銀槽遅延線を ENIAC に搭載できなかったが、その後創業したエッカート・モークリー・コンピュータ社 (Eckert-Mauchly Computer Corporation, EMCC) において商用の UNIVAC の開発を開始し、開発資金難からレミントンランド社に身売りしてその UNIVAC 事業部責任者として開発を継続し、ついに納入した UNIVAC 1 号に搭載している。モークリーとエッカートが EDVAC 開発プロジェクトから離脱した結果、EDVAC の開発は遅れ (1952 年に完成)、ENIAC 誕生のニュースが流れた直後に開発を開始した英国ケンブリッジ大学数学研究所のデジタルコンピュータ開発チームがプログラム保存用記憶装置を組み込んだ EDSAC (1949 年に完成) を先に完成させている。MIT サーボ機構研究所におけるデジタルコンピュータ開発チームは EDVAC 開発に関する情報を入手し、その研究成果を受け継ぎつつも、独自に開発した磁気コア記憶装置を組み込んだデジタルコンピュータ Whirlwind を開発している。

2.2. Whirlwind 開発プロジェクト

ヴァネヴァー・ブッシュの微分解析機に関する研究を受け継ぎ、かつ大学院生の研究を促進する目的で、ゴードン・ブラウン (Gordon S. Brown) が MIT (Massachusetts Institute of Technology) 電気工学部付置研究所としてサーボ機構研究所 (Servomechanisms Laboratory) を 1940 年春に設立した。そのサーボ機構研究所が多くの大学院生を受け入れるとともに、政府機関、特に軍事機関から提供される膨大な研究開発資金を使った多数のプロジェクトを組織して多くの大学院生への教育効果、すなわち優れた博士論文

作成の促進をはかった³。MIT (マサチューセッツ工科大学) の電気工学部長と副学長、そしてワシントン・カーネギー研究所 (Carnegie Institution of Washington) 総長を歴任し、当時のルーズベルト大統領の私的科学顧問となったヴァネヴァー・ブッシュ (Vannevar Bush) は、第二次世界大戦が勃発し日独伊 3 国同盟による軍事侵攻が強まる中で、ルーズベルト大統領に進言して 1940 年に設立された国防調査委員会 (NDRC) の委員長に、そして 1941 年に設立された科学研究開発局 (OSRD) の局長になった。ヴァネヴァー・ブッシュが強力な後ろ盾となり、MIT 全体として多数の軍事研究開発プロジェクトを受け入れ、終戦までに 1 億ドル以上を受け取り、サーボ機構研究所だけでも年間 100 万ドルをはるかに超える金額を受け取ったとされる⁴。

そのサーボ機構研究所が実施した軍事関連研究開発プロジェクトの 1 つが 1944 年に海軍航空局特殊装置部からの委託と開発資金を得てサーボ機構を組み込む飛行機安定制御分析装置 (ASCA) のプロジェクトであった。このプロジェクトは、既存の飛行機だけでなく、開発中の飛行機の実験データから運用飛行条件をシミュレートして、パイロットの飛行訓練だけでなく新開発飛行機の実験も行う二重目的の装置を開発するプロジェクトであった。開発中の装置を制御する微分解析機では目的が達成できず、ENIAC 誕生の知らせを知った終戦後に、このプロジェクトチームはその飛行機安定制御分析装置 (ASCA) の制御をパンチ・テープ⁵から読取った数値をデジタルコンピュータにより処理して制御するアイデアに転換し、軍機関を通じて EDVAC 開発に関する情報を入手し参考にした上で、Whirlwind と命名したデジタルコンピュータの開発に重点を移すことになった。Whirlwind は、飛行機安定制御分析装置 (ASCA) を制御するデジタルコンピュータとして開発が開始された経緯から、リアルタイムに処理できるだけでなく、ディスプレイ装置を見ながらインタラクティブ (対話的) に処理できるように開発が追求され、後にレーダーから集めたデータをリアルタイムに処理して CRT ディスプレイ装置に表示できる SAGE 用コンピュータを開発する基となり、他方で工作機械をコンピュータ制御する NC 工作機械及びそれと連動する CAD/CAM システム、そして広範な応用が期待されるコンピュータ・グラフィックス・システムを開発する基となり、Time Sharing system として進化する全ての起点になった。

3. メインフレーム型システムの誕生

3.1. 要素の誕生

(1) SAGE プロジェクトへの応用

終戦後、陸軍航空隊が陸軍から独立して空軍となった 2 年後の 1949 年 9 月に、空軍当局は、冷戦体制が始まる中でソ連が原爆実験に成功した情報を知って、ソ連の軍用機から米本土への原爆攻撃の可能性に危機感を持つようになり、空軍科学諮問委員会 (SAB) に防空対策案の検討を依頼し、その SAB は直ちに MIT の物理学教授 George E. Valley を長とする防空システム工学委員会 (ADSEC、通称バレー委員会) を設置し、防空システムの改善に関する検討を依頼した。バレー委員会は MIT サーボ機構研究所における Whirlwind 開発研究の成果と空軍ケンブリッジ研究所 (CRL) におけるレーダーデータのデジタル送信に関する研究の成果を結び付けて、空軍当局にデジタルコンピュータを活用した防空システムの構築を提言した。空軍当局から委託の予備実験 Charles プロジェクトにおける Whirlwind コンピュータを使った追尾迎撃実験の成功を受けて、SAGE (Semi-Automatic Ground Environment) と呼ばれる初めてデジタルコンピュータを活用する半自動防空システムを構築するプロジェクトが始まった。空軍当局からの指示により、1952 年に MIT に SAGE 用の研究を行うリンカーン研究所 (Whirlwind 開発チームは MIT サーボ機構研究所から独立して MIT デジタルコンピュータ研究所を設立したが、すぐにこの研究所の第 6 部として編入し、SAGE 用

にレーダーからデータを電話回線で集めて処理できるように Whirlwind を改良する研究を担当) が設立され、SAGE の元になる実験的防空システム Cape Cod System の第 1 回目実験が 1953 年 9 月に実施された。

改良された Whirlwind を基に SAGE 用に大量にデジタルコンピュータを製造するにはコンピュータ・メーカーの協力が必要であり、入札の結果 IBM 社が選ばれ、Whirlwind 開発チームに IBM 社の技術者も加わって開発作業が進められた。Whirlwind が求めるリアルタイム処理の実現を可能にしたのが主記憶装置として組み込まれた磁気コア記憶装置の改良である。

リンカーン研究所において Whirlwind が完成して磁気コア記憶装置を搭載し、また IBM 社の磁気ドラム記憶装置をバッファ用補助記憶装置として加えて安定性が増した後、この Whirlwind を基にして IBM 社が AN / FSQ-7 (空軍品番) を大量製造し、空軍本部のマクガイル空軍基地へ設置されたのを皮切りに、最大計 23 カ所の空軍地方司令部に 2 台 1 組で設置され、初めてデジタルコンピュータが防空に使用された SAGE (Semi-Automatic Ground Environment) が稼働を始めた。AN / FSQ-7 は米国の国境沿いに広く設置されたレーダーから集められたデータをリアルタイムで処理するだけでなく、司令部に設置されたコンソールの前に座る軍スタッフが、図 1 に見られる CRT ディスプレイに向けてライトガンという入力装置でマップ表示を求めると、もし敵機があれば CRT ディスプレイ上のマップ上にある小さな四角部分が点灯する、まさにインタラクティブな機能をもった情報システムであった。SAGE 用にリアルタイム処理を可能にしたのが磁気コア記憶装置であるが、それを改良・試験するために別途構築された小型デジタルコンピュータの MTC (Memory Test Computer) であり、この構築を担当したのが後に DEC を創業するケネス・オルセン (Kenneth H. Olsen) とオルセンに誘われ DEC に入社するベン・ガーレー (Ben Gurley) であり、そしてウェズリー・クラーク (Wesley A. Clark) である。彼らはさらにこの MTC をトランジスタ化した TX-0 も構築したが、この TX-0 にはライトガンを小型化したライトペンと CRT ディスプレイが備え付けられ、インタラクティブに利用することができた。

さらに AN / FSQ-7 は半導体技術の発展にも寄与している。AN / FSQ-7 に搭載される磁気コア記憶装置を制御する回路板には安定性を高めたシリコン酸化膜トランジスタが使用されたが、これは IBM 社から研究開発委託を受けてフェアチャイルド・セミコンダクター社が開発したものであり、その後の集積回路 (IC) の誕生にも結び付く。

(2) 世界初のデジタルコンピュータ制御 NC 工作機械の誕生

Whirlwind を開発した MIT サーボ機構研究所はデジタルコンピュータの Whirlwind を活用して工作機械を数値制御 (Numerical Control : NC) するシステムの開発にも取り組んだ。MIT サーボ機構研究所は Whirlwind プロジェクトが山場を迎えていた時期に、工作機械の数値制御に関するプロジェクトをも引き受けた。そのきっかけは、ヘリコプターを製造する企業経営者ジョン・C・パーソンズが MIT への協力を依頼したことで始まった。パーソンズはヘリコプター用プロペラの製造を効率化するために空軍に工作機械の数値制御 (NC) に関する研究の提案を行い、1949 年に 20 万ドルの契約を得て MIT に協力を依頼した。サ

図 1 CRT ディスプレイとライトガン



出典：MIT リンカーン研究所

<https://www.ll.mit.edu/about/history/sage-semi-automatic-ground-environment-air-defense-system>

ーボ機構に関する研究と経験を積んでいたサーボ機構研究所がパーソンズと共に空軍から研究委託を受ける形に契約を結び直して工作機械の数値制御に関する研究を行うプロジェクト（いわゆるパーソンズ・プロジェクト）が始まった。

William Pease と James McDonough をリーダーとする MIT サーボ機構研究所の数値制御プロジェクト・チームは、1952 年 9 月に MIT サーボ機構研究所の施設において世界初の NC フライス盤の公開実演が行なわれた。図 2 を見ると、中央に設置されたフライス盤の左側に Director (=Whirlwind) と呼ばれるコンピュータが並び、3 軸 NC フライス盤（ベースはシンシナティ社製）と接続され数値制御を行う。Director に加工用プログラムを読み込ませる手段として紙テープ・リーダー装置が使われ、その紙テープは Flexowriter というタイプライターによって打ち抜かれて作成される。

MIT のサーボ機構研究所は空軍の資金提供により、1953 年にベンディックスとカーニー・アンド・

トレッカー社向けには MIT の Whirlwind をベースとした Director の構築を行い、1953 年 3 月のギディングズ&ルイス社向けには、GE の記録再生制御システムを NC 装置に変換し、加工用プログラムのリーダーには紙テープではなく磁気テープを使ったハイブリッドな Director の構築を行った⁶。この GE / G&L 向けの Director と NC 工作機械のセットを Numericord システムと呼び、再び空軍の資金提供により、ロッキード社のスキนมイルに応用され⁷、Numericord システムの公開実演は 1955 年 6 月に行われた。

1959 年に空軍が 100 台を超える NC 旋盤の発注を発表し、約 6200 万ドルの資金を負担したことにより米国の NC 工作機械市場も活気づき⁸、1960 年にシカゴで開催された全米工作機械展示会では、数ダースの NC 工作機械メーカーが集い、約 100 例に近い NC 工作機械が展示された⁹。その展示会でカーニー&トレッカー (K&T) 社も後にマシニングセンターと呼ばれることになる「ミルウォーキーマチック (MM)」を展示し有名になった。この MM は、全ての工具が NC 工作機械の傍にある回転台の上に並べられ、1 つの工程が終わるごとに、ロボットのような腕が工具を外して回転台に戻し、代わりに他の工具を回転台から取り出して装着する仕組みであり、交換できる工具は 30 個であり、その後のモデルは 60 個であった¹⁰。1957 年に、NC 工作機械の開発チームに加わっていた MIT の Milton C. Shaw 教授がドイツのアーヘン大学に客員教授として招かれ、翌年のアーヘン大学第 9 回特別講演会「制御の構成要素と工作機械制御」において米国の NC 工作機械について発表した。独ジューメンズ社は、このときの発表の情報を入手して自社の研究所で NC 工作機械の研究を開始し、約 6 年後の 1964 年にドイツ初の実用 NC 装置を開発し、ハノーファーの工作機械見本市に SINUMERIK の品名で出品している¹¹。

MIT の NC 工作機械プロジェクトチームは NC 工作機械が完成した後、再び空軍からの資金提供により加工部品の数値を紙テープの加工用プログラムに自動変換するソフトウェアである APT (Automatically Programmed Tools) の開発にも着手した。汎用コンピュータを NC 工作機械用の APT コンピュータに変換するために、1956 年の秋までに APT プログラミングの基礎を明確にしたうえで、航空機産業協会・数値制御小委員会主催により航空機メーカー 19 社が参加した共同作業の結果、1959 年に APT が完成した¹²。この APT 開発プロジェクトが終了した 1959 年 12 月 1 日に、この APT と連動させるコンピュータを使った設計 (CAD:

図 2 世界初の CNC 工作機械

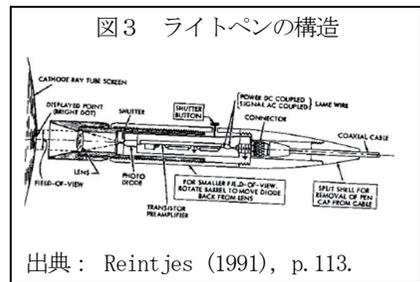


出典

<http://industrialscenery.blogspot.com/2017/02/first-nc-machine-tool-in-1952.html>

Computer-Aided Design) のプログラムシステムに関する研究プロジェクト契約を空軍と結んだ。この CAD プロジェクトは 1970 年 1 月 31 日まで 10 年 1 か月、計 146 人が参加し、AED-1、RWORD、AED-1R、CADET など一連の AED (Automated Engineering Design) プログラムシステムを開発するとともに、CAD プロジェクトの中心メンバーの 1 人であったダグラス・ロス (Douglas T. Ross) は CAD/CAM システム、製品データ管理、および製品ライフサイクル管理に特化したソフトウェア会社 SofTech 社を創設している。CAD プロジェクトにおけるプログラム研究を支えたのは、MIT のキャンパスに設置された Time Sharing System のコンピュータであった。まずは Whirlwind がプロジェクトを終えた後、MIT のキャンパスに設置されて自由に (利用時間をシェアして) 使うことができ、その Whirlwind が廃止される 1958 年からは、リンカーン研究所の決定により TX-0 がキャンパスに設置されて自由に利用できるようになった。

DEC が PDP-1 の開発・販売を開始した 1960 年には DEC によって 1 台の PDP-1 が MIT に寄贈され、MAC プロジェクトで導入された Time Sharing System の中央コンピュータとその PDP-1 が接続され、その PDP-1 と CRT ディスプレイが付いたコンソールを接続して、CAD プロジェクトに利用された。PDP-1 とコンソールの接続が容易であったのは、DEC が PDP-1 を開発し販売する前に PDP-1 にも利用される論理回路盤モジュールを製造・販売しており、コンソールがこの論理回路盤モジュールを使っ



て構築されていたからであった¹³。これら MIT のキャンパスで利用できた Whirlwind、TX-0、PDP-1 はライトペンとインタラクティブ CRT ディスプレイを備えた Time Sharing System であった。これらを利用して CAD プロジェクトチームは AED プログラムシステムの開発だけでなく、Time Sharing System の進化につながるライトペンやインタラクティブ CRT ディスプレイの開発にもかかわった¹⁴。図3のライトペンは SAGE 用に開発されたライトガンを小型化したものであり、またインタラクティブ CRT ディスプレイの開発では、コンピュータからの信号への応答に要する時間の短縮とコンピュータによる処理の負荷をいかに軽減するかが重要となる。効率的な CAD 作業にリアルタイム処理だけでなく、入力装置のライトペンと出力装置の CRT ディスプレイを使ったインタラクティブ処理が必要なことは、入力装置と出力装置にパンチカードシステムを使うバッチ処理コンピュータを使って CAD 作業を行う場合を想定して比較してみたら、明白である。

このように、MIT サーボ機構研究所における Whirlwind を開発する研究は NC 工作機械を開発する研究を派生させただけでなく、CAD/CAM システムを開発する研究も派生させるとともに、その関連で CRT ディスプレイ装置を備えた Time Sharing System の重要性が増し、DEC や SUN Microsystems 社が CAD/CAM 用アプリケーション・プログラムを搭載するワークステーションもそのような Time sharing System である必要があった。

Time Sharing System 及び CAD/CAM システムの進化につながるインタラクティブ・グラフィックスの研究は、空軍からの委託によって研究に取り組む MIT の CAD プロジェクトチームだけでなく、ARPA の IPTO が資金援助する各研究拠点大学や民間研究所の研究プロジェクトにおいても取り組まれた。IPTO 2 代目室長であったアイバン・サザランド (Ivan E. Sutherland) は特にコンピュータグラフィックス分野の研究プロジェクトに多くの研究資金を供給している。MIT リンカーン研究所に研究資金を供給して Whirlwind を基にトランジスタ式の Time Sharing System である TX-2 が構築されたが、それはコンピュータグラフィックスと AI の研究が想定され、特殊仕様のペン入力装置とそれに反応する特殊仕様の CRT ディスプレイが開発されて備え付けられていた。アイバン・サザランドはこの TX-2 を利用してペン入力装置によって CRT デ

イスブレイをなぞって簡単に図形描画ができる Sketchpad と呼ばれるアプリケーション・プログラムも自ら開発している。

3.2. IBM 社による System/360 の開発

IBM 社は SAGE プロジェクトの後にオンライン処理の機能を商用コンピュータに活用するために、1960 年にアメリカン航空との共同開発によって航空チケット予約システムの Sabre システムを実現した。これは世界初の汎用大型デジタルコンピュータを活用した商用オンライン処理情報システムとなる。IBM 社にはこの SAGE プロジェクトの成果に加えて、さらにコンピュータを進化させる軍事関連の政府資金による研究開発プロジェクトを利用した。1955 年に NSA (国家安全局: 電子機器を通じた情報収集・スパイ活動) がコンピュータの開発委託を依頼し、翌年に AEC (原子力委員会: 核兵器開発) ロスアラモス研究所が高速処理コンピュータ開発委託を依頼した。両者からの資金提供によって始まったそれぞれのコンピュータの研究開発は、両者の要求を同時に満たすコンピュータの研究開発プロジェクトとして統合され、“STRETCH” プロジェクトと命名された。

AEC ロスアラモス研究所の要求は科学計算の高速処理であるのに対し、NSA の要求は大量のキャラクター (アルファベットや記号) を含むデータの高速処理であった。当時、IBM 社は科学計算用デジタルコンピュータとキャラクターを含むデータを扱うビジネス計算用デジタルコンピュータとを別々に開発して市場に投入していたが、市場ニーズの変化として、科学計算用デジタルコンピュータにもキャラクターを含むデータの処理が求められ、ビジネス計算用デジタルコンピュータにも高速処理が求められるようになっていた。両政府機関の要求を同時に反映するデジタルコンピュータの開発はちょうどこの市場ニーズの変化に対応するよいチャンスであった。STRETCH コンピュータの開発に当たっては 2 つの点が柱となった。1 つ目は真空管に替わる論理素子としてトランジスタを採用することであり、2 つ目はアーキテクチャを統一することであり、キャラクターを含むデータも十分に扱える 8 ビット (これを 1 バイトと表現) を基本単位とするアーキテクチャが選択された。真空管に替わってトランジスタを採用するに当たり、回路盤製造組立技術の SMS (Standard Modular Systems) が実用化された。SMS は規格化された回路盤を自動的に設計・製造 (プリント) し、その回路盤にトランジスタやダイオードなどを自動的に挿入し、自動的に配線を行い、自動的にバックパネルに連結する、それ自体がデジタルコンピュータによって制御される自動製造機械である。この SMS 技術の基礎は、陸軍通信隊工学研究所 (SCEL) と AT&T 社ベル電話研究所で開発されていたが、IBM 社は STRETCH プロジェクト用に、陸軍通信隊工学研究所とベル電話研究所の成果を吸収して自社用の製造技術として実用化した。最初の STRETCH コンピュータは 1961 年 4 月にロスアラモス研究所に納入された。この STRETCH コンピュータは後に IBM7030 と改名され、1958 年以降の商用トランジスタ・コンピュータ 7000 シリーズのベースとなり、また System/360 の開発にも活かされることになった。

1961 年に IBM 社副社長の T・V・リルソンは 1960 年代のコンピュータ・システムに関する新しい計画を作成する Task Group (特別チーム) の設置を指示し¹⁵、これが SPREAD (Systems Programming, Research, Engineering and Development) 委員会と呼ばれ、1961 年 12 月に最終報告書¹⁶を提出した。その SPREAD 委員会の最終報告書を受けて、IBM 社は総額 2 兆円を投じて歴史的な System/360 開発プロジェクトを開始した。その最終報告書において検討が必要と提起された要因は、①コスト/性能の改善や信頼性を約束する固体論理素子技術 (SLT)、②新たな市場の需要として多数端末・オンライン・リアルタイム・多重プログラミング操作が可能なシステム、③異なるシステムが要求する多くのアプリケーション・プログラムへの爆発的需要、④プロセッサ製品を生み出す 15~20 のエンジニア・グループにおける調整の確立、⑤事業部や WT 社 ([IBM 社の多国籍子会社) のそれぞれのラインにまたがる既存のプロセッサ製品と新しいプロセッサ製品

との関連性である。

これらの要因のうち、①の個体論理素子技術 (Solid Logic Technology : SLT) は System/360 用に、STRETCH プロジェクトで実用化したトランジスタを自動挿入する回路板の自動製造機械を改良したものであり¹⁷、モノリシック集積回路(単一の半導体基板上に複数の構成要素が一体化した、ハイブリッド型ではない本来の集積回路)の初期 System/360 からの導入は次期早々ということで見送られ、幾つかのトランジスタやダイオードを組み合わせて挿入されるいわゆるハイブリッド型集積回路を自動製造する機械である。②の多数端末・オンライン・リアルタイム・多重プログラミング処理のコンピュータは SAGE 用コンピュータの成果を活かし発展させるものである。③の要因は、STRETCH によって科学計算用とビジネス計算用はアーキテクチャが統一されたとは言え、依然として新機種コンピュータに組み込むアプリケーション・プログラムは新しく開発されねばならず、顧客が求めるアプリケーション・プログラムの量と質、そして多様化へのニーズの高まりは、IBM 社にとって極めて重いアプリケーション・プログラム開発負担となっていたこと、さらに IBM 社が開発に必要な資金と人員の多くを多様な CPU (=論理回路盤) の開発に使い、アプリケーション・プログラム開発に注ぎ込む資金と人員が少なかったことがあった。アプリケーション・プログラム需要の増大と新たな市場ニーズを反映して、アプリケーション・プログラムにおける互換性の拡大が考慮され、8 ビットを基本単位とするアーキテクチャと CPU を拡張性かつ継続性のあるものに改良して、シリーズでまとめられた機種群内では旧機種で搭載されていたアプリケーション・プログラムが新機種や高性能機種にもそのまま搭載できるようにした。また CPU 開発において節約できた開発資金と人員をアプリケーション・プログラムの開発に振り向けることができるようになった。アプリケーション・プログラムの互換性と開発の効率性および周辺装置の互換性という点で、今日につながる転換も追求された。周辺装置の互換性という点では、「限られた周辺機器によって引き起こされる“スループット (単位時間当たりのデータ転送量)” 増大の問題を解決するために、SPREAD 報告書は、ファミリー内の各プロセッサ (著者: コンピュータ本体) に標準の周辺機器インターフェースを提供する IBM 7030 (Stretch) の発明を要求した¹⁸」と述べる。SPREAD 委員会の最終報告書は「遠隔処理 (tele-processing)、プロセス管理、軍事的指揮・統制、情報検索、および他のリアル・タイム・システムは高度にカスタム化されたソフトウェアを必要とするであろう。しかし同類のシステムに共通する幾つかの機能を分離し、いつでも実行可能な多目的ソフトウェア・パッケージを供給する傾向に向かうであろう」¹⁹と明言したが、いわゆる Operating System とアプリケーション・プログラムの分離である。IBM System 360 において初めて Operating System という言葉が使用され、同じシリーズ内では同じ OS/360 が組み込まれ、端末装置を通してオンライン処理が可能になり、また同じアプリケーション・プログラムのパッケージと周辺機器を使用することができるようになった。

IBM 社の System/360 開発プロジェクトは 1961 年から 1965 年まで実施され、IBM 社が投入した支出総額 50 億ドルは一つの企業が実施したプロジェクトとしては前代未聞の規模をもっていた。IBM 社のライン・マネージャーであった B. エバンズが System/360 は「とてもすばらしいリスクであり、他の何かをするより、あるいは全く何もしないよりも極めてリスクの少ないものである」と述べたように、この System/360 が IBM 社に大きな飛躍をもたらすと予測され、1950 年代に IBM 社が取り組んだ SAGE プロジェクトと STRETCH プロジェクトの成果を最大限に活かして、商用コンピュータ市場で他社を圧倒できる揺るがない自信があったからであった。しかし IBM 社は System/360 への Time Sharing System 機能の搭載は遅れ、MIT が MAC プロジェクト用に必要な Time Sharing System 機能を持つコンピュータの入札において GE 社に負けた。Time Sharing System 化はユーザーの強いニーズでもあり、IBM 社は Time Sharing System 化を追求して、ようやく 1967 年 10 月発表の System/360 model 67 において実現した²⁰。Time Sharing System という言葉

とそれへの熱望は Whirlwind の開発と利用にかかわった MIT の大学院生たちの間に広がった理由は、コンピュータ用プログラム作成実験のし易さにおけるバッチ処理（複数のプログラムからなる作業をあらかじめ

連の手順で登録し、特定の時間にまとめて連続的に実行する）するコンピュータとインタラクティブ（interactive：対話的）にリアルタイム処理するコンピュータとの大きな違いであった。System/360 が 7 割近くの市場シェアを奪うほどになり、業界内部では、IBM 社を“白雪姫”に例え、その主な競争相手を“七人の小人たち”に例えられるほどになった。その後は、IBM 社から System/360 を購入してリース業を行う業者が増える一方、IBM 社を相手にした反トラスト法訴訟の嵐が吹き荒れることになった。

IBM 社はアプリケーション・プログラム類をコンピュータ本体に組み込み一体的に料金を示し、アプリケーション・プログラム類の料金を明示していなかったが、反トラスト法訴訟を考慮して、1968 年 12 月にアプリケーション・プログラム類の価格をコンピュータ本体の価格から分離する「アンバンドリング（unbundling）」を発表し、他の業者が自社製アプリケーション・プログラムを販売できるようにするとともに、IBM 社はそれらアプリケーション・プログラム類をハードウェア（Hardware：金物類＝コンピュータ本体）に對置させる新しい造語の“ソフトウェア（Software）”と表現し²¹、ソフトウェアの概念が誕生し業界に広がった。

3.3. DEC によるミニコンピュータの開発・販売

前述のように TX-0 の構築を担当したのがケネス・オルセン、ベン・ガーレー、ウェズリー・クラークである。ケネス・オルセンは TX-0 構築の経験をビジネスに活かすことと、また TX-0 に対する MIT のプログラム研究者たちの熱烈なニーズを理解したことにより、1957 年にリンカーン研究所元同僚のハーラン・アンダーソンと弟のスタン・オルセンとともに Digital Equipment Corporation (DEC) を創設するとともに、米国最初のベンチャーキャピタルとなる American Research and Development (AR&D) から投資を得ることに成功した。AR&D の初代社長となったハーバード大学のジョルジュ・ドリオット教授は、新会社の 70% の所有権と引き換えに、70,000 ドルの拠出に同意しただけでなく、1987 年に亡くなるまでケネス・オルセンへの良き支援者でもあった。DEC という名前と最初の製品選択は、コンピュータの将来性に対する AR&D 取締役会一部にあった懐疑的な見方を反映し、最初の製品はリンカーン研究所時代に TX-0 を構築した経験を基に大量に製造した回路版モジュールを磁気コア・メモリー試験用に販売し、コンピュータの製造は後に行うという決定にもつながった²²。DEC はその回路版モジュールを AT&T ベル研究所やカリフォルニア工科大学などに出荷して利益をあげるとともに、リンカーン研究所時代に TX-0 の構築にかかわったベン・ガーレーを採用し、先行して販売した論理回路盤モジュールを基に 1959 年から最初のコンピュータ PDP-1 の開発を開始し、翌年には最初の出荷を開始し、エンジニアリング・コンサルティング会社の Bolt, Beranek, Newman、植字会社 ITEK、およびローレンス・リバモア国立研究所に販売され、商用初は 1962 年の ITT 社への 15 台の販売となった²³。

TX-0 が最初から Time Sharing System として MIT のキャンパスに置かれてプログラム研究者たちに利用されたように、DEC 最初の商用コンピュータ PDP-1 も最初から Time Sharing System であり、その 1 台が DEC から MIT に寄贈され、プログラム研究者たちに喜んで利用された。PDP-1 の基になった TX-0 には既にコンピュータ制御の CRT ディスプレイとライトペンシステムが備えられた²⁴。図 4 を見ると、コンソールの前方に TX-0 が見え、コンソールの右端にあるのが CRT ディスプレイであり、TX-0 の処理結果が表示される。

DEC はアプリケーション・プログラムの開発費やマーケティング費用を省略し、IBM 社の同性能のメイン

フレームの5分の1から10分の1の価格(12万ドル)の低価格で販売した。1965年に出荷が開始されたPDP-8は新たに登場した集積回路(IC)が最初に採用された12ビットコンピュータであり、どのメインフレームよりも小さくて安く(荷造り用の箱に納まり、1万8000ドルの低価格)、これ以降、メインフレームの小型廉価版という意味でミニコンピュータと呼ばれるようになった。DECの急成長を支えたミニコンピュータ販売の長期的な契約形態がOEM(Original Equipment Manufacture)販売である²⁵。すなわちこれはDECのミニコンピュータに自社製アプリケーション・プログラムを組み込んで情報システムとして販売する業者などにDEC製ミニコンピュータを長期的な契約として販売するものである。その代表的な例は、DECがCAD/CAMシステムを顧客に販売する業者にPDPシリーズのミニコンピュータを販売し、その業者は自社製CAD/CAMアプリケーション・プログラムを組み込んでCAD/CAMシステムとして顧客に販売する長期的な関係である。特にDECのPDPシリーズは最初のPDP-1のときからCAD/CAMシステムの利用に適したTime Sharing Systemであるとともに、CRTディスプレイとペン入力装置も備え付けられていたことが強みであった。

図4 TX-0とCRTディスプレイ



出典：Earls(2004)

コンソールの前方奥に見えるのがTX-0本体、右端がCRTディスプレイ。

4. クライアント/サーバー型システム

4.1. 要素の誕生

(1) ワンチップ・マイクロプロセッサの誕生

1970年頃の日本における早川電機工業(シャープ)社、カシオ計算機社、キャノン社、大井電気社、ビジコン社など30社を超えるメーカーによる激しい低価格競争の中で、ビジコン社が電卓開発を効率化するためにLSIチップを活用した新しい電卓の開発に挑んだことがワンチップ・マイクロプロセッサの誕生につながった。

ビジコン社は米国の調査専門会社に依頼して電卓用LSIチップの開発を委託する米国の半導体メーカーとして、創業間もないIntel社(Fairchild Semiconductor社を退職したRobert N. NoyceとGordon E. Mooreが1968年に創業)とMostek社(Texas Instruments社の元社員が1969年に創業)と契約を結んだ。一方でビジコン社はMostek社との間ではワンチップの電卓用LSIのMK6010を共同開発し、持ち運び可能な電卓Handy LE-120を1971年に発売した。他方でビジコン社はIntel社との間では、プログラム格納用ROMチップ(製品番号4001)、RAMチップ(製品番号4002)、シフト・レジスタ用チップ(製品番号4003)、CPUチップ²⁶(製品番号4004)からなり、CPU、ROM、RAMの3種のチップ間の接続を特別なインターフェースを介さずに4ビットの双方向性バスと数本の制御信号ラインだけで実現する4チップ構成を1970年10月から1971年3月にかけて共同開発し、ROMチップの交換だけで新しい機能が追加できる電卓141-PFを1972年に発売した²⁷。このビジコン社とIntel社との間で共同開発されたCPUチップ(製品番号4004)が歴史上最初のワンチップ・マイクロプロセッサとして重要性が認識されるようになった。この4ビット

CPU チップ 4004 の開発にかかわった Intel 社のファジンが電卓以外の応用可能性に気づいて上層部に進言し、Intel 社はビジコン社がまだ独占購入権を持っていたにもかかわらず、契約上の曖昧さを利用して新しい用途の売り込み先を探すとともに、1971 年の 6 月から 8 月にかけて、電卓の大量生産化競争による資金的な問題が生じていたビジコン社との間で交渉を行い、開発費の返却と製造された LSI チップの低価格納入を条件に、他社への販売の許可を獲得した。

元ビジコン社の嶋正利は 1972 年にロバート・ノイスにスカウトされ Intel 社に転職した。嶋正利は開発リーダーのフェデリコ・ファジンとともに CPU の開発を担当し、再び論理設計で重要な役割を果たすとともに、新しい半導体製造技術 (n-MOS) を使って完成させ性能を飛躍的に向上させた 8 ビット CPU 8080 を 1974 年 2 月に発表した。これ以降、ワンチップ・マイクロプロセッサ市場において Intel 社の強力な競合メーカーは、CPU 8080 を発表した 1 か月後に Intel 社と同じワンチップ・マイクロプロセッサの MC6800 を発表した Motorola 社と、Intel 社による CPU 8080 の発表直後に、フェデリコ・ファジンと嶋正利が Intel 社を退職して創設したザイログ (Zilog) 社 (8 ビット Z80 を商品化) であり、Intel 社の CPU 8080 と激しく市場競争するようになった。

Intel 社の CPU 8080 の市場投入をきっかけに、ワンチップ・マイクロプロセッサを購入して小型コンピュータを組み立てる愛好家のブームが起り、そのような状況の中で、スティーブ・ジョブズ (Steve Jobs) が Apple 社を創設して小型コンピュータ本体に CRT ディスプレイとキーボード入力装置も付属し、付属の BASIC が OS の役割も果たしながら、電源を入れるだけではじめから Time Sharing System として利用できる Apple II を開発・販売して大ヒットし、パーソナル・コンピュータ (パソコン) 市場を創造した。メインフレーム市場を圧倒的に支配する IBM 社がパソコン市場における Apple 社の躍進を見て、1981 年 8 月に製品名 IBM Personal Computer²⁸ (型番 5150) を発表してパソコン市場に参入し、一気にアップル社を追い抜いてこの分野でもトップ企業に踊り出たが、この Personal Computer では Intel 社の CPU 8086 の機能限定廉価版であった CPU 8088 が採用された。パソコン市場でも成功した IBM 社は Personal Computer (型番 5150) と同じ CPU 8086 系列 (共通命令セットを採用) の CPU 80286 を採用した IBM Personal Computer AT (型番 5170) を 1984 年に発表した。IBM 社はパソコン市場への早期参入とアプリケーション・ソフトウェアの早期充実を優先し、バイオスのみ自社製にしてアーキテクチャを公開し、ワンチップ・マイクロプロセッサを Intel 社に委託し、パソコン用オペレーティング・システム (OS) を Microsoft 社に開発委託した結果、この IBM Personal Computer AT (略称 IBM PC/AT) を市場に投入した際に、Compaq Computer 社や DELL Computer 社など他のパソコン・メーカーから IBM 社のパソコンと同じワンチップ・マイクロプロセッサ (Intel 社の CPU)、OS (マイクロソフト社の MS-DOS)、そして多数のアプリケーション・ソフトウェアが利用できる、いわゆる PC/AT 互換機が誕生した。IBM 社よりいち早く 32 ビット CPU 80386 を採用した「Desk Pro 386」を市場に投入した Compaq Computer 社は販売シェアで IBM 社を追い抜き、業界トップに躍り出た。パソコン用の OS とワンチップ・マイクロプロセッサを PC/AT 互換機に提供する Microsoft 社と Intel 社が他の競合企業を圧倒して巨大企業へ急成長した。

(2) Time Sharing System 研究の推進と UNIX の誕生

1958 年 2 月に誕生した国防総省所属で国防長官直轄組織の ARPA (Advanced Research Projects Agency : 先端研究プロジェクト局) は、前イリノイ大学電気工学部教授のジャック・ルイナ (Jack P. Ruina) が 3 代目局長になったとき、空軍が開発委託し IBM 社が製造した AN/FSQ-32 (真空管式であった SAGE 用 AN/FSQ-7 をトランジスタ化。1 台の製造で大量配備計画が中止となる) の管理と活用を ARPA が引き受け、また AN/FSQ-32 の管理と活用の担当者として、MIT リンカーン研究所で働くジョセフ・リックライダー (J. C. R.

Licklider) をスカウトした。リックライダーは ARPA 内に IPTO (情報処理技術室) を創設してその初代室長になり、AN/FSQ-32 を Time Sharing System に改良する開発委託契約を SAGE プロジェクトにもかかわった RAND 研究所から Spin-off した SDC (System Development Corporation) に与え、Time Sharing System 化した AN/FSQ-32 をロサンゼルス近郊サンタモニカにある SDC の施設に設置し、それを共同利用する Time Sharing System 研究を促進するために、コンピュータ科学の拠点となる大学に研究プロジェクトを組織し多額の研究プロジェクト資金を提供したが、このことはコンピュータ科学の研究を促進しただけでなく、その教育研究条件の充実にもつながり、多くの大学でのコンピュータ科学系学部学科の創設に帰結した。

大学で実施された Time Sharing System 研究の代表的なプロジェクトが 1963 年 7 月に MIT で開始された MAC プロジェクトである。ARPA の IPTO 初代室長のジョセフ・リックライダーの提案と研究プロジェクト資金の提供によって、MIT が全学的に Time Sharing System を教育や研究に利用する MAC プロジェクトが、初代プロジェクト代表にロバート・M・ファerno (Robert M. Fano) が就任して開始された。フェルナンド・J・コルバト (Fernando J. Corbato) をリーダーとする研究チームは、MIT キャンパスで利用ニーズが強かった Whirlwind が使えなくなることを配慮して、MIT の計算機センターで使われていた IBM 社のバッチ処理コンピュータ IBM 709 を改良し必要な時に Time Sharing System モードに切りかえて利用できるようにする CTSS (Compatible Time Sharing System) を開発し、それによって最大 30 人の利用者が同時利用できた²⁸。ジョセフ・リックライダーは ARPA の IPTO 室長を辞職して MIT に戻った後、MAC プロジェクト二代目代表 (1968 年から 1971 年) として Time Sharing System 研究を推進している。

MIT は CTSS (Compatible Time Sharing System) を開発した経験を活かし、IPTO からの研究プロジェクト資金の提供を受けてさらに進化した Time Sharing System を開発すべく、GE 社と AT&T 社ベル電話研究所を誘って共同で MULTICS プロジェクトを開始した。MULTICS プロジェクトは目標 100 台の多数端末から同時にアクセスしながらインタラクティブ・リアルタイム処理を可能にする Time Sharing System の実現をめざし、それゆえ大掛かりで極めて複雑なシステム構成となり、完成するには多くの時間とコストを要することがしだいに明らかになった。GE と違い AT&T 社は多数端末 Time Sharing System を開発しても販売できず社内利用に制限されていたため、AT&T 社の利益に合致しないものとなり、ベル電話研究所の役員会は MULTICS プロジェクトからの撤退を決定した。MULTICS プロジェクトの成果として Time Sharing System となった GE 社の GE 645 が MAC プロジェクト用に MIT に納入されたが、これは 100 人以上の利用者が同時にアクセスしてインタラクティブにリアルタイム処理で利用できた³⁰。

MULTICS プロジェクトに参加していたベル電話研究所の二人の研究者 (ケン・トンプソンとデニス・リッチ) はそのプロジェクトからの撤退を惜しみ、役員会には内緒で研究用の予算は付かなかったが個人的に研究を継続した。研究予算が全くないトンプソンとリッチーはベル電話研究所内で廃棄処分の予定となっていた旧式の DEC 社 PDP-7 によって UNIX の開発を開始し、これが故障で使えなくなるや、別の口実で得た最新式の PDP-11 を使って UNIX の開発を続け、ようやく 1971 年 11 月に First Edition を完成させた。UNIX の開発に当たっては Multics の失敗を教訓とし、完成したシステムは極めてシンプルで独立したモジュール群により構成されるようにした。このことはプロジェクト名の MULTICS の MULTI を UNI に変えた UNICS と表現し、後に発音が同じ UNIX に変更したことに表されている。

UNIX を開発したケネス・トンプソンとデニス・リッチーが 1973 年にバデュー大学において開催されたオペレーティングシステム理論のシンポジウムにおいて講演したとき、この講演を聞いたカリフォルニア大学バークレー校 (UCB) のロバート・ファブリー (Robert S. Fabry) 教授は UNIX に強い関心を持ち、その導入を計った。UNIX が使える DEC の PDP-11/45 が大学によって購入された後の 1974 年 1 月、トンプソンから UNIX ver. 4 が入った磁気テープが届き、それを PDP-11/45 にインストールして稼働した³¹。

1975年9月、UCBの卒業生でもあったケネス・トンプソンは勤めていたAT&Tベル電話研究所における1年間の休暇を利用してUCBに客員教授として赴任するとともに、UCBが新しく購入したPDP-11/70にUNIX ver. 6をインストールした。ちょうどこのときに大学院に入学したウィリアム・ジョイ (William N. Joy、ビル・ジョイが愛称) が、UNIX ver. 6の設定やプログラミングにもかかわるようになり、Pascalコンパイラの機能拡張も手掛けるようになった。ケネス・トンプソンが研究所に戻った後、送られてくるアップデート用のソースコードをUCBのUNIXに反映させる過程において、ビル・ジョイはUNIXのソースコードに精通するようになり、UCB版UNIX (BSD) の開発・改良へとつながった。最初のきっかけは機能拡張版Pascalコンパイルを求める学外からの声に応えるためであったが、開発した様々な便利なツールをまとめて「Berkeley Software Distribution (BSD)」の名称で求めに応じてオープンソースで配布し³²、オープンソース形態でのUCB版UNIXの普及となった。

(3) ALTOのLAN接続とEthernet、そしてGUI

複写機のシェアで世界トップのゼロックス社はコンピュータ・メーカーのSDS社を買収し、それに伴って同社2番目の研究所、コンピュータ関連の研究を行うパロアルト研究所 (PARC) を1970年に西海岸のパロアルト市に設立した。その研究所設立に当たって、ゼロックス社における研究所設立の責任者となったジョージ・ペイク (セントルイス・ワシントン大学の元学長) は、元ARPA・IPTO3代目室長でユタ大学に赴任していたロバート・テイラー (Robert W. Taylor) と会って相談し、テイラーの助言により3つの研究室、すなわち総合サイエンス研究室 (GSL)、システムサイエンス研究室 (SSL)、コンピュータサイエンス研究室 (CSL) を設立し、ペイクが所長兼GSL室長となり、テイラーは研究よりもマネジメントを好み、彼が直接誘った元BBN社のジェリー・エルキンドがCSLの室長となり、彼自身はCSLの副室長となった。テイラーはIPTOの室長であった際にTime Sharing System関連のプロジェクトを積極的に推進し、特に彼がかかわって有名なのはカリフォルニア大学バークレー校のGENIEプロジェクトであり、SDS社の24ビット商用バッチ処理コンピュータSDS 930をTime Sharing Systemに改造してSDS 940システムを開発したように、PARCのCSLにおいてTime Sharing Systemの進化を計ろうとした。テイラーからの誘いによって、小型コンピュータALTOで世界初のGUIを実現するプログラミング言語Smalltalkを開発したアラン・ケイ (Alan C. Kay) を始め、ARPAの研究プロジェクトに関連する多くの人材が流入した。ちなみにアラン・ケイはユタ大学の大学院生のときに、ユタ大学に赴任した元IPTO2代目室長アイバン・サザランドおよび元IPTO3代目室長テイラーの下で、IPTO4代目室長ローレンスから提供されたプロジェクト資金を使って、改良版Sketchpadを含む先駆的グラフィックス・アプリケーションの開発に従事しており、PARCへの参加はその経験を活かすものである。

CSLにTime Sharing Systemを導入・稼働した1972年以後、テイラーたちはCSLの次の目標としてTime Sharing Systemの進化形として「パーソナル・コンピュータのネットワーク化」を目指すようになった。Time Sharing Systemの処理エンジンはCPUであり、そのCPUがクロックの鼓動 (回路を電子がめぐる鼓動のひとつひとつをサイクルと呼ぶ) によってプログラムが要求するタスクをこなす。Time Sharing Systemが多数の端末によって多数の利用者から同時に利用されるようになると、利用者が使うプログラムの数や種類によってCPUに求められるサイクルが変化・増大し、CPUの限度を超えるとリアルタイム処理に支障となり、処理結果の表示が遅くなってしまふ。解決の方向は2つであり、1つは1台のTime Sharing Systemの処理能力を高める方向であり、もう1つは1人が1台のインタラクティブ・リアルタイム処理コンピュータを占有する方向である。テイラーが提唱したのは「1人1台のコンピュータ」であり、Apple社がApple IIを商品化した1977年より5年も早かった。

アラン・ケイは「創造的なアイデアのためのダイナミックなメディア」となるコンピュータを「Dynabook」と命名し、書類、詩、手紙、領収書、レコード、絵、漫画、音符、シミュレーションなどあらゆる情報が本のサイズのコンピュータに収納され、いつでも取り出せる仕組みを構想した³³。今日で言う iPad mini のような構想であり、当時はさすがに本のサイズは無理があったので、デスクトップ・サイズの構想に変更されたが、後に革命的なパーソナル・コンピュータ ALTO が完成した際には、その CRT ディスプレイは通常の縦と横の長さが逆になった縦長であり、それに表示される文書作成画面はノートブックのページの様相であった。

CSL の ALTO 開発チームは多数の利用者によって共有されない、1 人の利用者によって占有されるパーソナル・コンピュータの開発を目指したが、Time Sharing System の本質であるインタラクティブ・リアルタイム処理の進化した形態の追求は忘れなかった。ARPA の IPTO がプロジェクト資金を提供して推進するコンピュータグラフィックスや入出力装置の進歩にも取り組んでいる。アラン・ケイはコンピュータグラフィックス研究の成果を取り入れて世界で初めて GUI (Graphical User Interface) を実現するためのプログラミング言語 Smalltalk を開発したが、その GUI を機能させるためには、ビットマップ表示が可能な CRT ディスプレイと新しい入力装置であるマウスの開発が必要であった。ビットマップ表示が可能な CRT ディスプレイは TV 受像機メーカーの開発努力があつて安く入手することは可能であったが、ビットマップ表示させるにはコンピュータのメモリー消費が多く、そのメモリー消費を少なくする工夫を加えながら、その分を GUI の改良に充てた。ダグラス・エンゲルバート (Douglas C. Engelbart) が行ったユーザーインターフェイスとアナログ式マウスの研究を参考にしてバトラー・ランプソン (Butler W. Lampson) とチャック・タッカーの二人が ALTO の設計とデジタル式小型マウスの開発を行った³⁴。またチャールズ・ゲシキ (Charles M. Geschke) とジョン・ワーノック (John Warnock) が CRT ディスプレイで見たままに印刷できるページ記述言語「WYSIWYG」も開発し、それに対応したプリンタも開発した。完成した GUI 搭載の ALTO は小型マウスを使って簡単に ALTO を操作できるだけでなく、小型マウスを使って図形描画を行うことができ、文字の大きさや図形の位置が自由に変えることができ、ディスプレイで見たままに印刷できる革命的なインタラクティブ・リアルタイム処理のパーソナルなコンピュータであった。さらに ALTO 同士は相互に簡単にネットワーク接続が可能であり、短距離ネットワーク接続 (Local Area Network : LAN) の基礎も築いた。

テイラーは IPTO 3 代目室長であったときに、ARPANET によって実現される異機種コンピュータのネットワーク接続を構想し自身が実現しようとしていたが、別の仕事に従事するために IPTO 室長を辞任し、彼が MIT リンカーン研究所から引き抜いたローレンス・ロバーツ (Lawrence G. Roberts) を IPTO 4 代目室長に指名し、異機種コンピュータのネットワーク接続の課題を託した。ロバーツが実現した ARPANET では、コンピュータ同士の接続は長距離にわたり、IMP (Interface Message Processor : 保管と転送の機能を持つメッセージ転送専用コンピュータ)³⁵を介在させることによって、直接にはネットワーク接続が困難な異機種コンピュータ同士をネットワーク接続させ、さらに転送先で他の発信者からの干渉が起こりそうなどときには待機し、干渉の可能性が無くなった際に改めて転送される機能を持つことによって、安定的なネットワーク接続を実現させた。それに対し、ALTO 開発チームのロバート・メトカーフ (Robert M. Metcalfe) とデビッド・ボグス (David R. Boggs) は ALTO を使った LAN を想定し、経済性の観点から、IMP のような介在物を省いて、ALTO 同士が直接にネットワーク接続できるように構想した。これを実現するために二人は CPU 処理の高速性を利用し、発信者である一方の ALTO が他方の ALTO の発信による干渉を感じた場合には、数百分の 1 秒だけ発信を中止し、再度発信する Ethernet と呼ぶ仕組みを開発した。この Ethernet は ALTO 同士や、PARC 内の皆が共同で使う機器を LAN に結び付けることになった³⁶。

ALTO やそれと関連した周辺製品の商業生産をゼロックス社本社が見送ったことで、それらの開発に携わっていた多くの人材が PARC を退社して他の企業に移る者や自ら新しい企業を創業する者が続出し、移った職場で大きな貢献をすることになった。ALTO の開発に関わった人材は Apple 社に雇われて商用 GUI パーソナル・コンピュータ Macintosh の開発に貢献し、Microsoft 社に雇われて Windows や WYSIWYG 対応のワープロソフト Word の開発に貢献した。WYSIWYG の開発を担当したチャールズ・ゲンシキとジョン・ワーノックは 1982 年に Adobe Systems 社を設立し、プリンターメーカー向けページ記述言語 PostScript を 1985 年に発表・供給し、Apple 社に採用された。Adobe Systems 社は他にも Illustrator、Photoshop、Premiere などを開発・販売している。Ethernet の開発者の一人であったロバート・メトカーフ (Robert M. Metcalfe) は 1979 年に 3Com 社を設立して LAN の構築に欠かせない Ethernet 関連製品の開発・販売を担い、Ethernet 規格及び LAN の普及に貢献した。

(4) NC 工作機械の ME 化、PLC と工場内 LAN 通信規格の登場

日本のファナック (FANUC) 社がインテル社製 CPU の Intel 8086 を採用して NC 装置「システム 6」を 1978 年に開発して以来、CPU 搭載 NC 装置が主流となった。そうになると、CPU 搭載 NC 工作機械はミニコンピュータを使った CAD/ CAM システムとネットワーク接続されて ME 制御されるようになるが、CAD/ CAM システムを搭載するコンピュータがミニコンピュータからより安価なワークステーションに置き換わるとともに、CAD/ CAM システム用に普及した SUN Microsystems 社のワークステーションが、さらにインターネットと接続しその一翼を担う LAN の中心であるサーバーとして使われるようになると、工場内 LAN につながる NC 工作機械を ME 制御する重要な役割も担うようになった。

そのファナック (FANUC) 社の CPU 搭載 NC 装置は、ハードウェアとソフトウェアを分離したうえ、ハードウェアの NC 装置をできるだけ標準的な構成にして製品ラインナップもできるだけ少なくし、機械特性の違いや独自の要求に対しては、ソフトウェアをモジュール化することで対応した。1985 年 9 月に量産出荷された NC 装置の「ファナックシリーズ 0」はこの点で大成功した。出荷後 10 年間の累積出荷台数は約 28 万台にものぼり、世界一のベストセラー NC 装置となった。故障率が 1 台あたり 0.008 件という高い信頼性に加え、工作機械メーカーや自動車メーカーなど、最終ユーザーの多様なニーズに応えるためにオーダーメイドマクロというカスタム化機能を提供した。このカスタム化機能を利用して工作機械メーカーや最終ユーザーはファナックの手を借りずに自由に独自機能などを加えることができるようになった。それを実現するためにファナック社はソフトウェアをユーザーモジュール、ベンダーモジュール、ツールキットモジュールの 3 つに分割した³⁷。

以前はリレー装置によって行われていた工場の自動生産機械群の統合的な制御が PLC (Programmable Logic Controller、独: SPS, Speicher Programmierbare Steuerung) と呼ばれる半導体回路によって制御される形に転換した。最初の PLC 製品は 1969 年米国 GM 社の求めに応じ米 Modicon 社により商品化されたものである³⁸。自動車工場で使われていた数百・数千のリレー装置やメカニカルタイマーをトランジスタ回路装置に置き換えるものであり、工場レイアウトの変更に伴って生じる製造関連機械制御盤の配線を変更する代わりに、PLC に組み込まれたプログラムの変更で対応できるようになった。これにより、これまでのコストのかかる作業停止を必要としていた段取替え時間の大幅短縮が可能となった。半導体技術の進化によりトランジスタ回路からマイクロプロセッサ回路に進化した PLC はそれぞれの NC 工作機械やトランスファーマシンを制御するだけでなく、それぞれの機械に設置されたセンサーから様々なデータを吸い込むと同時にコンピュータに送り込み、コンピュータがそのデータを統計処理してそれぞれの機械の稼働状況や労働者の作業状況などを監視できるようになった。

ドイツの製造工場への PLC の導入は、Beckhoff Automation 社に代表されるソフトウェア PLC と Phoenix Contact 社に代表されるハードウェア PLC がある。ソフトウェア PLC は産業用 PC (パソコン) にインストールされて PLC として利用することができる。

ドイツでは、まず Siemens、Bosch、ABB 等が共同で 1989 年に通信規格 Profibus を開発し、これを普及するための組織である PNO (PROFIBUS Nutzerorganisation) を発足させた。2018 年 4 月現在、PI (PROFIBUS & PROFINET International) の支部は全世界 25 ヶ国におかれ、1300 以上のベンダー企業やユーザー企業が会員として参加している。続いて 2003 年 4 月に独ベッコフ社によって EtherCAT が発表された。これは Ethernet ベースのフィールドバスであり同年 11 月にオープンネットワークとして技術仕様の管理や普及を行う団体 EtherCAT Technology Group が設立された。当初は独及び欧州を中心に 33 社のメンバーで始まり、2018 年 9 月現在のメンバー数は 5000 社を超える世界最大のフィールドバス団体となり、日本は約 600 社となる。EtherCAT P は 1 本のケーブルで EtherCAT 信号とデバイスの電源供給を行えるようにした。

4.2. SUN Microsystems 社によるワークステーションの開発

マサチューセッツ州チェルムスフォードに本拠にするアポロ・コンピュータ社が 1980 年に Motorola 社のワンチップ・マイクロプロセッサ MC6800 を使ったワークステーションを開発・発表した。次に、1980 年に CAD を専門とするデージー・システムズ社の設立に携わったビノッド・コースラ (Vinod Khosla) が CAD /CAM 処理に向けたワークステーションを探していた際に、スタンフォード大学の大学院生であり、Stanford University Network (SUN) プロジェクトで働いていたアンディ・ベクトルシャイム (Andy Bechtolsheim) が CAD /CAM 処理が可能な高性能ワークステーションを開発できる技能があることを知り、二人で、事業計画書を 1982 年 2 月に作成し、SUN Microsystems 社 (以下 SUN 社) を創業した³⁹。コースラが友人のスコット・マクニーリ (Scott G. McNealy) を SUN 社に誘うとともに、ベクトルシャイムとコースラはワークステーションを開発するに当たって開発期間を短くするオープンシステムにすることを選択し、ワンチップ・プロセッサはアポロ・コンピュータ社と同じ Motorola 社の MC6800 を採用するとともに、メーカー独自の OS という当時の業界傾向に反して UNIX を OS に選んだ。二人は SUN-1 に搭載した UNIX には満足できず、次の SUN-2 を開発するに当たって、UCB 版 UNIX (BSD) を開発していたウィリアム・ジョイ (ビル・ジョイ) を説得し 16 番目の社員ではあったが、創業者と同じ待遇 (自社株式の取得と地位) を与えて SUN 社への入社を説得した⁴⁰。

ビル・ジョイは当社の仕事と BSD の開発の両方にかかわっていたが、1982 年の夏の終わり頃には、UCB 版 UNIX (BSD) をベースに、SUN-2 に搭載する OS (SUN OS) の開発に専念するようになった。ビル・ジョイがベースにした UCB 版 UNIX (BSD) は ARPA からの資金援助によって ARPANET 対応 (TCP/IP 対応) の OS として利用できるように改良されていたので、INTERNET 対応の OS としても利用できた。このことは RISC 技術採用のワンチップ・マイクロプロセッサ開発によって高速処理を実現したことと相俟って、インターネット・ブームの時代に、SUN Microsystems 社のワークステーションがサーバーという新たな利用分野において圧倒的なシェアをもたらすことになった。結果的に、SUN Microsystems 社のワークステーションは UNIX を普及させると同時に最も成功した商用 Time Sharing System ということになった。

1982 年後半、SUN Microsystems 社はアポロ・コンピュータ社との競争に勝って CAD/CAM システム業界の最大手であったコンピュータビジョン社との 3 年 4 千万ドルの契約を勝ち取り、販売シェアでアポロ・コンピュータ社を追い抜くとともに、以後一貫して業界トップを維持続けた。Intel 社製と並んで市場で標準的な Motorola 社ワンチップ・マイクロプロセッサを使用しただけでなく、OS として UNIX を搭載し、Ethernet にも対応したオープンシステムであったことは競争上優位に働いた。

1984年春頃、RISC技術を採用した自社独自のワンチップ・マイクロプロセッサ、すなわちSPARCの開発に取り組み、3年以上の開発期間を経て、SPARCを1987年7月に発表し、1989年4月にそのSPARCを搭載したワークステーション SPARCステーション1を発表するとともに、1995年にウルトラSPARCを発表し、そのウルトラSPARCとともに、UNIXベースのSUN OSを改良したSolaris OSを搭載したワークステーションが1990年代後半からのインターネット・ブームの中でサーバーへのニーズの高まりを受けて、大成功することができた⁴¹。

4.3. 製造機器のFMS化とCIM構想、そしてERPおよびMESの登場

メインフレーム型システムからクライアント/サーバー型システムへの転換の過渡期である1980年代に、NC工作機械、PLC、およびトランスファーが有機的に結合されるとともにコンピュータによって制御されるFMS(フレキシブル生産システム)化が世界的に普及し、事務部門へのパソコンの導入とも相俟ってME革命とも称された。特に製造工場のFMS化に力を入れたのがドイツの自動車産業である。FMSの小型版はFMC(フレキシブル生産セル)と呼ばれるが、FMSないしFMCに関するドイツの導入実態調査(1985年秋)によれば、144社(このうち6割強が従業員千人を超える大企業)が278台導入であり、うちFMSが83台/FMCが195台であった。1983年秋に稼働したVW社のボルフスブルグ工場の新型ゴルフの最終組立ライン「ホール54」は約5億6千万マルクが投じられた世界最新鋭の組立工場であるが、約80台の組立ロボットが投入され、タイヤ、車軸、窓ガラス、ドア、シート、計器パネル、エンジンなどの自動組付けが実現された⁴²。

例えば、ドイツのZFフリードリヒスハーフェン社(Zahnradfabrik Friedrichafen AG)は1977年にFMSの開発作業を開始し、1982年に最初の工作機械を設置し、1984年秋から通常運転を開始した。その工場では、3つの部品グループからなる歯車をロットごとに切削加工するFMSが導入し、レイアウトは完全な「ソフト機械加工」すなわちワークの熱処理行程前までの必要な工程全てが配置され、異なる加工方法を持つ様々な機械の間でワークの待ち時間が大幅に縮小され、1つの生産セルは工作機械が1台のワーク自動着脱装置と3つの搬送機に組み合わせられ、もう1つのセルは搬送車待機所と自動着脱装置を備えた集中ワーク投入・輩出工程であり、工程間の結合は集中搬送設備を含めた自動倉庫によって行われ、PLCによって集権的に行われる⁴³。

ドイツの自動車製造業が全力をあげて取り組んだ生産合理化努力は、産業用ロボットやFMSなどのフレキシブル自動化技術の導入にとどまらず、自動車生産の計画・処理・生産諸経過において、情報・制御技術として利用可能なME技術の急激な発展によって構想され、すべての経営活動を「コンピュータによる統合的生産システム」(CIM)の構築によって合理的に管理する戦略も追求された。米国GM社の世界戦略小型車「サターン」(Saturn)の開発で明らかにされた工場LAN通信規格標準、MAP(Manufacturing Automation Protocol)の動きが世界的に注目を集め、日本とドイツにおいて工場LAN通信規格の標準化への動きが起こった。これは工場における生産管理のCIM化を想定したものである。生産管理情報システムのCIM化には、2つの方向でのシステム統合があり、①戦略的製品計画から研究開発、設計、生産制御、生産、品質管理から完成品へというシステム統合と②部品の発注・検査・供給に関わるメーカーとサプライヤー、さらにディーラーとメーカーとの統合(ロジスティクス上の情報システム統合)がある。

MESに関する著書においてドイツの研究者は、1980年代のCIM構想とIndustry 4.0構想と関連付けて次のように指摘する⁴⁴。

早くも1980年代に、CIM構想は、機械の高度な自動化とより多くのインテリジェンス化を促進した。当時の問題、つまりCIMが失敗した理由の1つは、理論的なアプローチは利用できたが、具体的なアプリケーション

ョンを実装できなかったということであった。さらに、人間の役割は完全に無視されていた。当時、人々は無人の工場を夢見ていた。要するに CIM には全体的な概念が欠けていたと言える。Industry 4.0 の概念が成功しないので「CIM 2.0」として終わらないように、もっとよいものしていく必要がある。

メインフレームを基盤とした CIM 構想は立ち消えたが、クライアント/サーバー型情報システムを基盤に製造・販売一体情報システム統合が追求され、統合型情報システムとして ERP (Enterprise Resource Planning : 企業資源計画) が登場した。ERP は企業全体の経営資源 (ヒト、モノ、カネ、情報) の一元的な管理により、業務のムダを省いて経営資源を最適化しようとするものであり、サーバーに組み込む統合型アプリケーションの ERP パッケージが利用された。ERP パッケージの例として世界的に注目されたのが独 SAP 社の SAP/R3 である。この ERP とは別に、PLC と接続したセンサー装着の製造機器からのデータ収集と製造機器管理を行う情報システムとして MES (Manufacturing Execution System : 製造実行システム) が登場したが、これは 1990 年代に米国の調査会社 AMR Research 社が提唱したアイデアが原型となって誕生した。AMR Research 社は、製造業の管理層を①計画層 (Planning Layer)、②実行層 (Execution Layer)、③制御層 (Control Layer) の 3 層に分類したが、計画層を担うのが ERP であり、制御層を担うのが PLC であり、そして実行層を担うのが MES であり、これは 1980 年代のデータ取得情報システムから誕生し発展したものである。

5. クラウド型システムの誕生

5.1. 要素の誕生

(1) ARPANET の誕生と INTERNET への進化

ARPA は MIT を始め全国の主要な拠点研究大学と密接な関係をもちながら、軍事用途に結びつく最先端の研究成果を引き出す目的で、それら多くの大学に研究プロジェクトを組織して多額の研究資金を供給してきた。ARPA が IPTO を組織しその初代室長 J・C・R・リックライダーが多くの大学に研究プロジェクトを組織して Time Sharing System を共有して活用して行った研究や Time Sharing System を開発する研究に多額の資金を提供したことによって、コンピュータ科学分野の研究も促進され、多くの大学にコンピュータ科学を専門分野とする学部・学科も誕生した。

このような背景で ARPA は多くの大学とコンピュータ同士をネットワーク接続し、また他の軍事機関ともネットワーク接続して情報通信を行うようになっていた。しかしながら当時のコンピュータ同士のネットワーク接続は機種が同じでなければ不可能であり、ARPA でも軍事機関でも、ネットワーク接続相手と同じ機種のコンピュータを用意することは大きな負担になっており、異機種コンピュータのネットワーク接続を実現することは大きな課題であった。

MIT リンカーン研究所出身のローレンス・ロバーツは IPTO 4 代目室長に就任し、異機種コンピュータのネットワーク接続という困難な課題に本格的に取り組むことになった。ローレンス・ロバーツは、米国防総省の依頼で RAND 研究所が 1964 年に提出した「核戦争にも耐えうる軍事用通信システム」報告書を見つけ、それを参考に「核戦争にも耐えうる軍事用コンピュータ・ネットワーク」の実現を目的に予算確保し、RAND 研究所の報告書作成者であるポール・バラン (Paul Baran) も参加して異機種コンピュータのネットワーク接続の研究プロジェクトを、大学に委託するのではなく、ARPA の IPTO 自ら担う形で開始した。各大学や軍事機関が持つ異機種コンピュータを直接にネットワーク接続するのではなく、リンカーン研究所の同僚であったウエズリー・クラークの助言に基づいて、メッセージ転送専用ミニコンピュータ (ハネウェル社製 DDP-516 を基に開発) による「IMP : Interface Message Processor」によってネットワーク接続を

構成し、その IMP に異機種コンピュータを接続する方法が考案された。

IPTOからの委託でBBN社によって開発されたIMPが4か所、カリフォルニア大学ロサンゼルス校 (UCLA)、スタンフォード研究所、カリフォルニア大学サンタバーバラ校 (UCSB)、ユタ大学に設置され、IMPとそれぞれの大学が持つコンピュータとの接続は各大学に所属するコンピュータ科学の専門家が担当し、1969年12月に4か所間のメッセージ転送実験が成功し、ARPANETが誕生した。IMPに盛り込まれたメッセージ転送「パケット交換」と「保存と転送」の機能、IMPと各コンピュータの接続とメッセージ交換などがARPANETに関わった多くの専門研究者によって改良され共有され、TCP/IPという通信技術規格とオープンソースにまとめられた。

コンピュータ科学系の学部・学科を持つ大学でARPANETに参加できなかった大学同士がARPANETと同じ技術・仕組みで相互接続し、独自にコンピュータ・ネットワークが構築され、1981年からCSNET (Computer Science Network) として運営され、最初の5年間はNSF (全米科学財団) が資金提供し、その後はUCAR (大気圏研究大学連合) が資金負担して運営されるようになった。1986年にはコンピュータ科学系の学部・学科を持つ多くの大学がCSNETに接続する状況の下、セキュリティと軍事機密の事情から、ARPANETから軍事機関が離脱して独時にMILNETを構成するようになり、ARPANETは新たにNFSNETとしてNFS (全米科学財団) が管理運営を引き継ぐようになった。企業ユーザーがARPANETと同じ技術や接続の仕組みを採用するネットワーク接続を利用するための民間プロバイダ事業者が多数誕生し、それらが相互接続するようになった。CSNETがNSFNETに統合されるとともに、NSFがNSFNETの管理権を民間ボランティア団体に委譲するとともに、民間プロバイダ同士が相互接続して成立した複数のネットワークも接続されて巨大になったネットワーク全体が、INTERNETと呼ばれるようになり、米国だけでなく他の国の同様のネットワークが接続され、無限に巨大化している。INTERNETが無限に巨大化したのは、ネットワーク接続の技術的容易性もあるが、それ以上に、オープンソースとして誰もがフリー (自由かつ無料) で利用できることが大きかった。

INTERNETは当初はメッセージ転送機能とTELNET (遠隔操作) 機能しか使えなかったが、ヨーロッパ原子核研究機関 (the European Organization for Nuclear Research: CERN) で研究していたティモシー・バーナーズ＝リー (Timothy John Berners-Lee) がCERN内にそれぞれ遠く離れた施設に設置されINTERNETに接続されたコンピュータ内に電子的に保存された研究論文をお互いに参照しやすいようにソフトウェアを開発し相互利用する「情報管理に関する一つの提案」を行い、開発予算を得て1989年に完成しCERN内で運用されるようになった。これがWorld wide Web (略してWeb) という1種のデータベース・ソフトウェアであり、Apple社を追い出された創業者ジョブズが新たに創設したNEXT社のワークステーション「NEXT」においてそれに搭載されたUNIX系OSのもとで開発された。そのWebでは論文がHTMLというレイアウト言語で表現され、サーバー用ソフトのhttpdによりページからページへリンクで移り目的の論文を探すことができる。

NSFからの資金提供でイリノイ大学内に設置された全米スーパーコンピュータ応用研究所 (NCSA) においてアルバイトしていた学生たちのリーダー、マーク・アンドリーセン (Marc L. Andreessen) がCERNで運用されていたWebにアクセスしてその可能性に着目し、当局に提案して開発予算を確保し、写真ファイル表示機能とGUI機能を盛り込んだクライアント用 (Windows用、Mac用、UNIX用をそれぞれ開発) Web専用閲覧ソフト (ブラウザ・ソフト) の「Mozaic」とUNIXサーバー用ソフト「NCSA httpd」を開発し、オープンソースで無料公開し、爆発的に普及した。

Mozaicの人気爆発に欲が出た当局がそれを有償化し、学生たちへの介入を強めたことを契機に、Mozaicを開発したマーク・アンドリーセンをリーダーとする元学生たちが、シリコン・グラフィック社創業者の

ジム・クラークと創業したのが Netscape Communications 社であり、その最初の商用ブラウザ・ソフトが Netscape Navigator であり、その大ヒットによって Netscape Communications 社は急成長したが、マイクロソフト社からの提携要求を拒否し、対決姿勢を鮮明にしたことにより、マイクロソフト社は対抗するブラウザ・ソフト「Internet Explorer」を開発し、性能面で Netscape Navigator に追いつくとともに、Windows の中に無料ソフトとして組み込んだことにより、Netscape Communications 社からブラウザ・ソフトのシェアを奪った。

(2) UCB 版 UNIX (BSD) の ARPANET 対応

ARPANET は急激に拡大していったが、研究拠点ごとに異機種のコンピュータが導入され、したがって異なる Operating System (OS) が使用されていたために、研究成果として開発されたソフトウェア資源を他の研究拠点で共有することは容易でなかった。それらの研究拠点に設置されたコンピュータも古くなり、買い替えの時期も迫っていたが、国防総省の 1 機関である ARPA が資金援助している研究拠点に同じメーカーのコンピュータを導入させることは連邦政府原則という点からも難しかった。ARPA で様々な検討がなされた結果、異機種コンピュータを前提に、同じオペレーティングシステムを導入する解決策が選択され、移植性に優れた UNIX が標準化の対象として選択された。ARPA は、異機種コンピュータのネットワーク化を可能にして ARPANET を構築したが、さらにソフトウェア関連の研究成果の交流と普及を促進するために、異機種コンピュータにおける OS の統一を目指した。そこで、統一すべき OS として BSD 版 UNIX を選び、カリフォルニア大学バークレー校 (UCB) に BSD 版 UNIX を ARPANET に接続したコンピュータで利用できるようにするプロジェクトを組織してプロジェクト研究資金を提供した⁴⁵。

ARPA から意向を聞いた UCB のファブリーは開発中の 3BSD の拡張版が ARPA のニーズに応えることができると伝え、ARPA と UCB の間で開発プロジェクト契約が結ばれた。契約期間と内容は 18 か月以内に ARPANET 関係者 (ARPA、BBN 社⁴⁶、MIT、南カリフォルニア大学情報科学研究所、UCLA) が必要とする機能を 3BSD に実装するというものであり、当時大学院生のビル・ジョイも BSD 開発のリーダーとして参加した。1980 年に 4BSD がリリースされ、1981 年に 4.1BSD⁴⁴ がリリース (2 年間で約 400 本の発送) された。ARPA はこの 4.1BSD の成果に満足し、UCB と新たに 2 年間の開発契約を結んだ。ARPA のプログラマー・マネージャーであったドゥエイン・アダムスは年 2 回の割合で「運営委員会」を開催し、新システム的设计に ARPANET 関係者の要求を反映できるようにしている。BBN 社によって TCP/IP の実装仕様がリリースされるや、それが組み込まれ、インターフェイス部分も設計し直された 4.1aBSD が 1982 年 4 月にリリースされ、ARPA への納期限の 1983 年 4 月には 4.1cBSD⁴⁵ がリリースされた。

UCB が以前に開発した UNIX 部分と ARPA からの資金援助によって開発した UNIX 部分は UCB が無料のオープンソースとして公開したので、その後のフリーソフトウェア運動やオープンソース運動を支えることになる。

(3) オープンソース運動とオープンソースの普及

フリーソフトウェアのためのコミュニティの創設を始めたのは MIT 人工知能研究所の所員であったリチャード・ストールマン (Richard Stallman) である。人工知能研究所の所員たちは自作のソフトウェアをアップロードして自由に利用し合ったり、ソフトウェアのソースコードを教え合ったり、それらのソースコードの一部を書き換えて利用したりするコミュニティを作っていた。そのコミュニティの中心となっていた所員が創設した企業がほとんどの所員を引き抜くとともに、所員たちがコミュニティ用のインフラとして利用していた DEC のミニコンピュータが使えなくなり、そのコミュニティは消滅した。そのようなコ

コミュニティを復活させるために、ストールマンは無料で自由に改良できるフリーソフトウェアのインフラとして、UNIX と互換性のある OS (Operating System) の開発を目指すことにした。

ストールマンは MIT を退職し、開発すべき OS に再帰的な名称の「GNU (GNU' s Not UNIX)」を付け、GNU プロジェクトは 1984 年 1 月に始まった。UNIX 上でソースコードの編集ができる GNU Emacs エディタの開発に続き、複数のプログラミング言語をサポートし、異なる機種の上で動作し、異なる機種に対応した実行コードを生成できる構造を持ったコンパイラの開発に取り組んだ。GNU ソフトウェアの配布条件に、著作権 (copyright) を基にクローズドな製品への転用を防止する文言を盛り込む「コピーレフト (copyleft)」という使用許諾形態を採用した。GNU プロジェクトに参加する者が増える中で、プロジェクト運営資金を調達するために 1985 年に FSF (Free Software Foundation) が設立され、フリーソフトウェアが入っている配布テープや関連マニュアルを販売するようになった。GNU システムの部品として開発されたプログラムは実際に UNIX に実装されて利用できたので、幅広く利用されるようになり、様々なバージョンの UNIX に移植された⁴⁹。

リーナス・トーバルズ (Linus Torvalds) が 1991 年に Linux と呼ばれる UNIX 互換のカーネルの開発を始め、1992 年頃に GNU システムと統合されてフリーソフトウェアの OS として利用できるようになった結果、フリーソフトウェアのコミュニティが急激に拡大した。1998 年に、そのコミュニティの一部が新しいユーザーに対し「フリーソフトウェア」という言葉の使用を止めて「オープンソースソフトウェア (Open Source Software : OSS)」という言葉の使用を決定し、オープンソース運動が始まった。

オープンソース運動が大きく盛り上がる契機となったのは、マイクロソフト社とのブラウザ競争で苦境に陥ったネットスケープ・コミュニケーションズ社が 1998 年 1 月に自社有料ブラウザ・ソフト Netscape Navigator を無料配布すること、さらにその次期バージョンのソースコードを公開すると公表したことであった。特にソースコードの公開はオープンソースのコミュニティに大きな影響を与え、オープンソースを管理する組織として Mozilla 財団が誕生した。またオープンソースの普及を促進する組織として翌月の 2 月にブルース・ペレンズとエリック・レイモンドにより Open Source Initiative が設立され、同組織が策定し公表する文書「オープンソースの定義」に従ったソフトウェアをオープンソースのソフトウェアと定義した。

5.2. Amazon 社によるクラウドサービス AWS の開始

2010 年代に入って、新しい情報システムのサービス動向を指す言葉として“Cloud Computing”という言葉が頻繁に使われるようになった。2006 年 8 月、グーグル CEO のエリック・シュミットが、米国カリフォルニア州の「サーチエンジン戦略会議」において「“雲(Cloud)”のような、巨大なインターネットにアクセスすれば、その利益、恵みの雨を受けられる」と発言し、それを受けて生まれたとされるが、それ以前から ICT ベンダー業界では情報システム図を描く際にインターネットへの接続が“雲”の略図で表現されていたことの反映でもある。

Cloud Computing と表現されるサービスを提供するクラウド型システムは、クライアント/サーバー型システムを基礎に誕生し、無数のサーバーを並列処理と仮想化技術によって連結し、利用者には必要な程度に応じて処理能力を提供し、巨大なスーパーコンピュータのようにも、小型コンピュータのようにもみせることができるようになったものである。クラウド型システムをプラットフォームとして本業に利用しながら、Cloud Computing と呼ばれるようになるコンピュータ機能の貸し出しサービスをビジネスとして最初に始めたのは Amazon.com 社である。Web 2.0 提唱者でフリーソフトウェアとオープンソース運動の支援者であったティム・オライリー (Tim O'Reilly) からの提案を受けて API (Application Programming

Interface) を公開した Amazon.com 社は、他の Web サイトが Amazon.com 社の Web サイトの情報を無料で利用できるサービスとして AWS (Amazon Web Service) を始めた。その AWS が有料サービスとして 2006 年 3 月に「Simple Storage Service」(ファイルサーバー機能の貸し出しサービス) の提供を、そして 6 月には「EC2 : Elastic Computer Cloud」(コンピュータ処理機能の貸し出しサービス) の提供を行った。EC2 の場合、ユーザー企業は Amazon.com 社のデータセンターからインスタンスと呼ばれる仮想マシンを借りる。これが有料のクラウド型サービスの始まりである。AWS のユーザー企業として AWS の収益とサービス拡大に大きく貢献したのが、AWS のクラウド型コンピュータ・システムを利用して映画コンテンツの配信サービスを最初に開始して世界的な大企業へと成長した Netflix 社であった。

Amazon.com 社が AWS の有料サービスを始めたきっかけは、IT インフラの統括者クリス・ピンカムが故郷の南アフリカに戻り、退社せずに南アフリカのケープタウンに事務所を開いて仕事として好きな種類のアプリケーション・ソフトを Amazon.com 社のサーバーで動かすことにより「問題を検討したピンカムらは Xen という新しいオープンソースツールを利用する案を提出する。Xen を使うと、データセンターに置かれた 1 台の物理的サーバーでたくさんのアプリケーションを走らせることが簡単にできる。… (中略)。ここから生まれたのがエラスティック・コピュート・クラウド (EC2) —AWS の心臓部となるサービスであり、また、ウェブ 2.0 ブームの推進役ともなるサービスである」⁵⁰ とオープンソースとの関連が指摘される。

クラウド型サービスはオープンソースの仮想化技術の上に成り立つ。Amazon.com 社や Google 社は本業に使う大規模データセンターに適用して、仮想マシン (Virtual Machine) と呼ばれる膨大な数の論理的な実行空間を作り出し、Salesforce.com 社はアプリケーションを SaaS で仮想化する。仮想化とは「実際のハードウェアを隠蔽する」ことが出発点であり、同一マシン上に作られた論理的な空間が仮想マシンとなって、異なる OS が乗り、その上でアプリケーション・ソフトウェアが実行される。このハードウェアを隠蔽するしくみが「仮想化ソフトウェア」であり、「ハイパーバイザー」などと呼ばれる。その代表的なものに Vmware、Xen、KVM (Linux カーネル) などがある。

ビッグデータを処理するためにはクラウド型コンピュータ・システム上で利用される分散処理フレームワークのオープンソースソフトウェアが必要であり、その代表的なものが Hadoop と Spark である。Hadoop は、2004 年に Google 社が論文にて発表した分散処理フレームワーク・ソフトウェア MapReduce をもとに、米 Yahoo! 社の Doug Cutting が中心になって Apache プロジェクトとして 2006 年に開発された分散処理フレームワーク・ソフトウェアである。その長所は、第一にサーバーの台数に比例して処理能力が高められ、第二にどこか一つのサーバーで障害が起っても他のサーバーが対応することで安定性が高く、第三に Hadoop Streaming というソフトウェアを使えば、あらゆる言語でスクリプトが作成できることである。その短所はデータの格納場所が HDD や SSD であり、リアルタイムで特定のデータを見つけ出す高速処理には不向きなことである。Spark は Hadoop の 10~100 倍の速度を実現する分散処理フレームワーク・ソフトウェアであり、Hadoop が弱点とするリアルタイム処理に対応可能である。Spark はデータの格納場所をメモリーにすることでリアルタイム処理を可能にした。Spark はカリフォルニア大学バークレー校で開発が進められ、2014 年に Apache ソフトウェア財団に寄贈された。現在、Hadoop と Spark は共存関係にあり、リアルタイムの高速処理が求められるデータは Spark で処理され、メモリーに乗り切らない大きなデータを処理する場合には Hadoop で処理されるなど、使い分けがなされている。

5.3. 独インダストリー4.0 情報システム

(1) インダストリー4.0 情報システムの核となるサイバー・フィジカル・システム

ドイツの第 1 期メルケル政権が 2006 年 8 月に最初のハイテク戦略 (国家的な技術イノベーション戦略)

「Die Hightech-Strategie für Deutschland」を発表し、この枠組みで連邦政府の政策が第4期メルケル政権まで系統的に展開された。この第1期メルケル政権のとき、米国レーガン政権下の産業競争力委員会のように、教育研究大臣 Annette Schavan が諮問機関として、経済団体・産業界、金融機関、学術機関の他に労働組合も参加する「ビジネス界と科学界のための研究連合 (Forschungsunion Wirtschaft - Wissenschaft)」を招集し、その作業部会である Industrie 4.0 Working Group が 2012 年 10 月に acatech (科学技術アカデミー) と共同作成した政策提言書をドイツ連邦政府に提出し、さらにその Industrie 4.0 Working Group が 2013 年 4 月に最終報告書を発表した。

Industrie 4.0 Working Group 最終報告書の内容は第3期メルケル政権のハイテク戦略文書「The New High-Tech Strategy — Innovations for Germany」(2014年8月)にも盛り込まれたが、その中心的な内容はインダストリー4.0構想の実現であり、その柱とされるのが Cyber Physical System (CPS) の広範な実装である。その戦略的なねらいを最終報告書の要旨で次のように端的に表現する⁵¹。

製造工学分野のグローバル競争はますます激しくなり、モノのインターネット (IoT) とモノのサービスを製造業に展開する傾向が認められる国はドイツだけではない。さらに、ドイツの産業に脅威を与えるのはアジアの競争相手だけではない。米国も「先進的製造 (advanced manufacturing)」を促進するプログラムを通して産業の空洞化と戦う対策を講じている。工業生産からインダストリー4.0への移行をもたらすために、ドイツは二重の戦略を採用する必要がある。ドイツの製造機器業界は、情報通信技術をこれまでのハイテク戦略に一貫して統合することにより、世界市場でリーダーシップを維持し、スマート製造技術のリーディングサプライヤーになることができるはずである。同時に、CPSの技術と製品の新しい主要市場を創出し、サービスを提供する必要がある。この二重CPS戦略の目標を達成するために、インダストリー4.0の以下の機能を実装する必要がある。

- 価値ネットワークによる水平統合
- 価値連鎖全体を工学的 E2E デジタル統合
- 垂直統合とネットワーク化された製造システム

ドイツの CPS 二重戦略は、CPS の実装に取り組むドイツ製造機器業がグローバル市場においてドイツ製造業の競争力優位に寄与するだけでなく、CPS 実装した製造機器の販売においても競争優位を得るという意味である。そしてそのために実現をめざすのは3種類のネットワーク①「価値ネットワークによる水平統合」、②「価値連鎖全体の工学的 E2E デジタル統合」、③「垂直統合とネットワーク化された製造システム」を支える情報システムのネットワークである。すなわちこれらはマイケル・E・ポーターの価値連鎖 (Value Chain :) 分析の考え方に基づいて、最終的な付加価値の増大あるいは競争優位に結びつく企業活動のつながりをシステム的に捉え、それらを支える CPS 実装された情報システムの広範なネットワークを構築する戦略である。①の水平統合は同一の製品やサービスを提供する企業が連携して規模の経済を追求することを支える情報システム・ネットワークであり、③の垂直統合+製造システムの連結は原料や部品の調達から製品の販売に至るサプライチェーンマネジメントに関係する企業の連携を支える情報システム・ネットワークであり、②の価値連鎖全体の工学的 E2E デジタル統合は、かつて CIM 構構が追求して頓挫した、製品の開発・生産・労務・マーケティング・販売など、全ての企業活動の管理を支える様々なアプリケーション・ソフトを連携させて利用できる情報システム・ネットワークである。もし①から③まで実現したならば、インダストリー4.0が長期目標とする CPS 実装の情報システム・ネットワークは、製品の製造工程をデジタルな世界に再現するだけでなく、同時にあらゆる経済活動をデジタルな世界に再現する極めて画期的な情報システム・ネットワークである。

(2) ドイツにおける CPS 実装の実現に向けた取り組み

筆者は 2018 年と 2019 年にインダストリー 4.0 構想に沿った取り組み状況を知るために科研費研究チームとしてドイツの関連する研究所や大学、地域クラスター組織、そして製造分野企業を訪問し聞き取り調査を行ったが、調査結果をもとに、インダストリー 4.0 構想の柱である CPS 実装に関連すると思われる地域クラスター組織における研究所や大学の役割、製造分野企業の製品や企業連携の特徴を紹介しよう。

インダストリー 4.0 構想の実現に大きく関与するフラウンホーファー研究機構は全国に様々な 69 の研究所から構成される複合的な研究組織であり、年間研究費総額 29 億ユーロのうち約 70%は民間企業からの委託契約と公的財源による研究プロジェクトから発生する資金と、約 30%はドイツ連邦政府および州政府から経営維持費として提供される資金から賄われる。私たちの訪問調査への応対者はインダストリー 4.0 の取り組みについて次のように説明してくれた。当研究機構の所長が大学教員であるだけでなく、多くの大学教員が当研究機構のメンバーとなって企業との共同研究を担い、また若手研究者（大学院生や学生）の研究業績評価も行う。政府によるインダストリー 4.0 の政策はグローバル競争においてドイツが技術競争力を維持するための産業政策であり、当研究機構は政府と産業界の諮問機関の役割も果たす。当研究機構は大きく 2 つのプロジェクトに取り組み、1 つはインダストリー 4.0 の CPS が何を指すのか、共同で共通の理解を作っていくことと、標準化するための法的な制度を整えること、もう 1 つは共通理解に基づく CPS を実現する新しいソリューションをいかに創り出すかである。データサイエンスと AI を活用するアーキテクチャ・モデルが重要になる点や大企業だけでなく、中小企業でも CPS が実現できるようにオープンソースの開発・普及を基本に標準化とオープン化を進める点などの紹介もあった。

地域クラスターの成功事例として有名な its OWL の運営組織のスタッフから its OWL の中核企業の 1 つである Phoenix Contact 社を紹介され、2017 年に実施された電子的オートメーション・システムと部品に関する第 28 回国際見本市に参加して当社の展示ブースを見学した。当社の展示ブースでは、インダストリー 4.0 スマート工場の例として、ボールペンに名前を刻む工程を例に、RFID（電子タグ）を活用して、注文以降の製造までの作業自動化の実演例が紹介され、また CPS を支えることになる PLC の次世代プラットフォームとして PLCnext Technology をアピールするプレゼン動画が上映されていた。PLCnext Technology は OS としてオープンソースの Linux が組み込まれ、多様な言語で作成されたプログラムに対応できること（PLC に求められる役割が拡大し、生産分野と縁のない IT 系技術者が PLC プログラミングに関わる場面が増えることを想定）、そこから集められたビッグデータを当社クラウドの RROFI CLOUD（ドイツ IBM 社が構築）が処理して、発電設備の管理を例にいかにエネルギーの節約をもたらすかが紹介されていた。

ドイツ訪問調査を通じてミッテルヘッセン工科大学、ギーゼン大学、マールブルク大学の大学教員が紹介され研究交流を行うことができた。交流した大学教員から地域クラスター組織の Smart Electronic Factory (SEF) において中心的な役割を果たす Limtronik 社を紹介され、工場見学と聞き取り調査を行った。Limtronik 社は電子部品の受託製造を行う一方で、製造用システムの受託製造も引き受けているが、この後者のサービスと関連した追加サービスが CPS の将来的な実現につながる取り組みなので紹介する。製造システムの注文を受けた後に、その製造に必要な機械や材料を仕入れ、注文した企業の工場において製造システムを組み立てて設置する。その工場に設置された製造システムにはセンサーが組み込まれて IoT 化される。そして興味深い点は、製造システムの受託製造契約と料金には設置後の製造システムの稼働から得られたデータの解析と製造システムのメンテナンスや改良も含まれ、しかもそのデータ解析サービスを提供するのは同じ SEF に参加する別企業の IOTOS 社であり、Limtronik 社と IOTOS 社が長期的な協力関係を結んでいる点である。

6. おわりに

インダストリー4.0 構想提唱者、acatec (ドイツ科学アカデミー) 会長ヘニング・カガーマン (Henning Kagermann) によれば、その構想に至ったきっかけは 2008 年に起きた米リーマン・ブラザーズの経営破綻によって引き起こされた世界的な不況、いわゆるリーマンショックであり、ドイツ製造業の行く末に危機感を持ったことであった⁵²。インダストリー4.0 構想の柱となる CPS を実装したスマートな製造システムはビッグデータの処理と AI の活用が欠かせず、リーマンショックの頃に誕生し普及し始めたクラウド型システムによって初めて可能となるものであり、独 SAP 社出身のカガーマンがクラウド型システムの利用を前提にするのも当然であり、また Industrie 4.0 Working Group 最終報告書の共同執筆者にドイツポスト社社長の Johannes Helbig とともに、ドイツ AI 研究センター長の Wolfgang Wahlster が名を連ねるのも当然であろう。

本論文で明らかにしたように、今日のクラウド型システムは、史上最初の Time Sharing System、すなわちインタラクティブ・リアルタイム処理コンピュータである Whirlwind の今日的な進化形態であった。その Whirlwind 開発研究は、一方で SAGE (半自動防空システム) 用に応用された AN/FSQ-7 として国境沿いに多数設置されたレーダーからオンラインで送られてくる膨大なデータをリアルタイム処理しながら、オペレーターがライトガン (今日のマウスに相当) で処理結果の表示を指示するや、CRT ディスプレイ上のマップに表示され、他方で史上最初の NC 工作機械を誕生させ、それをデジタル制御するコンピュータとして応用されるだけでなく、加工対象物の数値をコンピュータが理解できる言語に自動的にプログラミングする APT アプリケーション・プログラムを誕生させ、さらにそれと連動する CAD (コンピュータによる設計支援) アプリケーション・プログラムも誕生させ、すなわち CAD/CAM システムをも誕生させた。CAD/CAM システムはそれを使って設計作業を行う場合、ディスプレイを見ながら入力作業を行い、コンピュータがリアルタイムで処理した結果をディスプレイに表示することが欠かせず、特に Time Sharing System であることが要求された。このような Whirlwind が一方で商用の CRT ディスプレイの利用を伴う多数の端末による同時利用とリアルタイム処理を可能にしたメインフレーム・システムの IBM SYSTEM/360 シリーズに進化し、他方で DEC の CAD/CAM システム用ミニコンピュータという Time Sharing System の進化形態、さらに SUN Microsystems 社の CAD/CAM システム用ワンチップ MPU 搭載ワークステーションおよび C/S 型システム用サーバーという Time Sharing System の進化形態に受け継がれた。UNIX という Time Sharing System 用の OS が搭載されたワークステーションが多数端末の同時利用を可能にするサーバーを担うとともに、ワンチップ・マイクロプロセッサの開発を前提に誕生したパーソナル・コンピュータがキーボード、マウス、ペン型入力機器という入力装置とディスプレイ (当初は CRT ディスプレイ、現在は液晶ディスプレイ) という出力装置を利用し、それ自体がパーソナル利用前提の小型 Time Sharing System でありながら、クライアント端末機の役割を担うクライアント/サーバー型システムを誕生させた。このクライアント/サーバー型システムの進化形態として、多数のサーバーが連結し並列処理と仮想技術によって統合されたのがクラウド型システムである。インダストリー4.0 構想が目指す CPS 実装された情報システムは、日々の生産活動と経営管理活動の結果として生じる膨大なビッグデータがリアルタイムで処理されながら、その処理結果がパソコンに接続のディスプレイ機器や専用の大型ディスプレイ機器にいつでも表示できる Time Sharing System の進化形態である。今日の CPS 研究がめざすのは、生産活動や取引活動から発生するビッグデータをどのように AI 処理かつリアルタイム処理を行い、どのようにモニター機器に表示するかの研究である。

また、米国では Whirlwind の誕生とそれからクライアント/サーバー型システムへの進化の過程が、戦時中は陸軍航空隊から、戦後は空軍から、その後 ARPA から提供された膨大な研究開発資金によって促進され

た結果、ハードウェア面ではアーキテクチャの標準化とオープン化が、ソフトウェア面ではオープンソースの普及による共有化が進行した。また拙著・高橋（2022）において明らかにしたことは、日米貿易摩擦と日本企業による競争力の脅威を背景に、いわゆるヤングレポート発表以後に、米国政府が国家戦略的に重要なハイテク分野における自国企業のグローバル競争力強化を目的に、自国企業の共同研究開発プロジェクトに政府が半額の研究開発資金を補助する、国家的技術イノベーション戦略の性格を持つ地域クラスター戦略を重視するようになったこと、そしてそのような地域クラスター戦略がドイツ連邦政府にも導入されたことが明らかにされた。ドイツの地域クラスター戦略では、IT系のスタートアップ企業の果たす役割が重視され、IT系スタートアップ企業がオープンソースを基礎に開発したアプリケーション・ソフトウェアであっても、地域クラスター組織内においてプラットフォーム型サービスを提供することによって収益を得ることができる。肝心な点はどのようなサービスが必要とされるかであり、そのサービスのビジネスモデルのあり方である。そしてこの論文では、ドイツのインダストリー4.0構想に沿った取組み状況を知るために科研費研究チームとしてドイツの関連する研究所や大学、地域クラスター組織、そして製造業企業を訪問し聞き取り調査を行った結果の簡単な紹介も行ったが、特に地域クラスター組織を基礎にした新しいビジネスモデルの追求が印象的であった。

注

1. Norberg(1996), pp. 76-87.
2. スコット・マッカトニー (2001)、53～54 頁。
3. MIT の Web サイトに掲載されている論文を参照した。Kyoung S. Paik, History of the MIT Servomechanisms Laboratory and its Implications for MIT' s Relations with Government and Industry, <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/128793>.
4. 同上。
5. Flexowriter というタイプライターでパンチ穴が付けられた紙テープからデータを読み取る。
6. Noble(2011) , p. 133.
7. George Younkin 「Origin of Numerical Control」 (<https://ieeexplore.ieee.org/author/37266918400>)
8. ホーランド (1992)、50 頁。
9. 同上、53 頁。
10. 同上、72 頁。
11. 幸田亮一 (2011)、185 頁。
12. Noble(2011) , p. 143.
13. Reintjes (1991), P. 124
14. Ibid, p. 113.
15. Fisher(1983), p. 103.
16. Haanstra(1961), pp. 6-26.
17. Fisher(1983), p. 106.
18. Evans(1983), P. 5.
19. Ibid., p. 14.
20. Fisher(1983), pp. 163-167.
21. Ceruzzi (1998), p. 106.
22. Schein (2004) , p. 37.
23. Ibid., p. 36.
24. Reintjes (1991), p. 112.
25. 岩淵明男 (1985)、103～106 頁。
26. 当時の Intel 社では、DRAM の開発は実施していたが、論理回路の設計経験者は不在であり、ビジコン社から派遣された技術者の嶋正利が論理回路の設計を担った。
27. 共同開発の当事者であった嶋正利が彼の著書、嶋正利 (1987) 『マイクロコンピュータの誕生 ―わが青春の4004』、21～91 頁において開発経緯や詳しい技術的内容を紹介している。

28. IBM 社が製品名に初めて Personal Computer を使用して大ヒットしたことによって、Personal Computer、略して PC という用語が業界や市場で広く使われるようになった。
29. Reintjes (1991), p. 107.
30. *Ibid*, p. 108.
31. McKusick (1999), p. 31.
32. *Ibid*, p. 33.
33. ダグラス・K・スミス (2005)、120 頁。
34. 同上、123~124 頁。
35. MIT 関係者の Leo Beranek、Richard Bolt、Robert Newman の 3 人によって設立された BBN 社が ARPA からの受注によりハネウェル社ミニコンピュータの DDP516 をベースに開発。
36. ダグラス・K・スミス (2005)、139 頁。
37. 柴田友厚 (2019)、166~168 頁。
38. <https://www.takagishokai.co.jp/product-search/2018/10/11/187> を参照。
39. カレン・サウスウィック (2000)、26~27 頁。
40. マーク・ホール/ジョン・バリー (1991)、30 頁。
41. 同上、132~136 頁。
42. 風間 (1997)、86~87 頁。
43. 野村 (1987)。
44. Kletti (2015), p. 271.
45. マーシャル・マクージック「パークレー版 UNIX の 20 年」(クリス・ディトナ+サム・オックマン+マークストーン編 (1999)『オープンソースソフトウェア - 彼らはいかにしてビジネススタンダードになったのか -』オーム社)、70~71 頁
46. ARPANET を構成するメッセージ転送専用コンピュータの IMP を開発した。
47. 当初 5.0 BSD と表記される予定が、UNIX System V を販売した AT&T 社から紛らわしいとクレームがあり、マイナーバージョンアップ表記となった。
48. McKusick (1999), pp. 36-37.
49. リチャード・ストールマン(1999)。
50. ブラッド・ストーン (2014)、298 頁。
51. Forschungsunion& acatec (April 2013), pp. 5-6.
52. 「“生みの親” が語るインダストリー4.0の本質とこれから」MONOist、2018年08月06日付、<https://monoist.itmedia.co.jp/mn/articles/1808/06/news053.html>

参考文献

<邦文>

- ・岩淵明男 (1985)『超エクセレントカンパニー DEC - 世界No.1 ミニコンピュータ・メーカーの戦略』TBSブリタニカ
- ・徳永重良 (1985)『西ドイツ自動車工業の労使関係』御茶の水書房
- ・佐藤公久 (1987)『新生産システム「MAP」の挑戦 - 究極のオートメーションをめざして』ダイヤモンド社
- ・嶋正利 (1987)『マイクロコンピュータの誕生 - わが青春の4004-』岩波書店
- ・野村正實/ノルベルト・アルトマン編 (1987)『西ドイツの技術革新と社会変動』第一書林
- ・マーク・ホール/ジョン・バリー (1991)『サンマイクロシステムズ - UNIX ワークステーションを創った男たち』アスキー出版局
- ・マックス・ホーランド (1992)『潰えた野望 - なぜバーグマスター社は消えたのか』ダイヤモンド社
- ・嶋正利 (1995)『次世代マイクロプロセッサ-マルチメディア革命をもたらす驚異のチップ-』日本経済新聞社
- ・風間信隆 (1997)『ドイツの生産モデルとフレキシビリティ - ドイツ自動車産業の生産合理化』中央経済社
- ・クリス・ディトナ+サム・オックマン+マークストーン編 (1999)『オープンソースソフトウェア - 彼らはいかにしてビジネススタンダードになったのか -』オーム社

- ・奥田耕士 (2000) 『傳田信行 インテルがまだ小さかった頃』 日刊工業新聞社
- ・カレン・サウスウィック (2000) 『サン・マイクロシステムズ ―世界的ハイテク企業の痛快マネジメント』 早川書房
- ・スコット・マッカトニー (2001) 『エニアック ―世界最初のコンピュータ開発秘話』 パーソナルメディア
- ・ダグラス・K・スミス+ロバート・C・アレキサンダー (2005) 『取り逃がした未来 ― 世界初のパソコン発明をふいにしたゼロックスの物語』 日本評論社
- ・幸田亮一 (2011) 『ドイツ工作機械工業の20世紀』 多賀出版
- ・ジョン・ガートナー (2013) 『世界の技術を支配するベル研究所の興亡』 文藝春秋
- ・産業オープンネット展準備委員会編 (2019) 『産業用ネットワークの教科書 ―IoT時代のものづくりを支えるネットワーク関連技術』 産業開発機構
- ・柴田友厚 (2019) 『日本のものづくりを支えたファナックとインテルの戦略』 光文社
- ・高橋信一 (2022) 『国の競争優位』 論の国際的影響とドイツの地域クラスター戦略』 『地域創生』 第41集、岐阜協立大学地域創生研究所

<欧米文>

- ・Haanstra, John W. and other (1961) ‘Processor Products –Final Report of SPREAD Task Group, December28,1961’, Annals of the History of Computing, Vol.5, Num. 1, January 1983. 1961年に提出されたIBMのSPREAD Task Groupによる最終報告書が転載されている。
- ・Redmond, Kent C. & Thomas M. Smith (1980), *Project Whirlwind –The History of A Pioneer Computer*, Digital Press.
- ・Evans, O. Bob(1983), Introduction to SPREAD Report,Annals of the History of Computing, Vol.5, Num. 1, January 1983.
- ・Astrahan, Morton M. and John F. Jacobs (1983), ‘History of the Design of the SAGE Computer –The AN/FSQ-7’, Annals of the History of Computing, Vol.5, Num. 4, October 1983.
- ・Fisher, Franklin M., James W. Mckie and Richard B. Mancke (1983), *IBM and The U.S. Data Processing Industry : An Economic History*, Praeger Publishers.
- ・Reintjes, J. Francis (1991), *Numerical Control - Making a New Technology*, Oxford University Press.
- ・Norberg,L.Arthurl and Judy E. O’ Neill (1996), *Transforming Computer Technology - Information Processing for the Pentagon, 1962-1986*, The Johns Hopkins University Press.
- ・Ceruzzi, Paul E. (1998), *A History of Modern Computing*, The MIT Press.
- ・Schein, Edgar H. (2004), *DEC Is Dead, Long Live DEC, The Lasting Legacy of Digital Equipment Corporation*, Berrett-Koehler Publishers.
- ・Earls,R.Alan (2004) , *IMAGES of America, DIGITAL EQUIPMENT CORPORATION*, Arcadia Publishing.
- ・Noble, David E. (2011) , *Forces of Production –a social History of Industrial Automation*, Transaction Publishers.
- ・Forschungsunion (Forschungsunion Wirtschaft - Wissenschaft) & acatec (NATIONAL ACADEMY OF SCIENCE AND ENGINEERING) (April 2013), Securing the future of German manufacturing industry, Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0, Federal Ministry of Education and Research.
- ・Kletti, Jurgen(Hrsg.)(2015), *MES–Manufacturing Execution System, Moderne Informationstechnologie unterstutzt die Wertschopfung, 2. Auflage*, Springer Vieweg.