

## 『デジタル変換期の渦中で』に関するレポート

作成者：Ritter Diaz、ビジネスコンサルタント  
東京、2021年2月17日

本題を書き始める前に、皆様にとって2021年が健康、愛、平和、繁栄に満ちた年となるよう祈っております。また、私の記事に関する多くの激励のコメントに心より感謝申し上げます。私の記事が、皆様の中で新たな分野への興味、また考えるきっかけとなれば、こんなに喜ばしいことはありません。

2020年6月、私は『日本のニューノーマル』というタイトルの記事を執筆しました。その中で私は、私たちが今直面している「ニューノーマル」とは、人々の活動がデジタル化され、人工知能(AI)の発達によって、それらがさらに加速、増大しているということを説明しました。このデジタル社会に取り残されない為にも、〈母国語〉、〈数学言語〉、国際コミュニケーションのための〈外国語〉に次ぐアプリケーションの言語、つまり私が第4の言語と呼んでいる〈コンピューター言語〉について、誰もが知識を深める必要があると言えます。

事実、〈コンピューター言語〉はこの地球上のあらゆる場所に存在し、もはやコンピュータープログラマーだけが取り扱う領域ではなくなりました。その証拠に、今回、コンサルティング会社 Alan Kei Associates (AKA) が日本で『エッジ・コンピューティング』を紹介する取り組みを支援するため、私にとっては専門外と言えるこの分野に私も足を踏み入れることになったのです。コンピューターテクノロジーにおけるこの新しい局面は、人工知能、機械学習、分散型データ管理の普及への道を作り始めたと言えます。

上記に加え、私の自然な好奇心は私の個人的・専門的な成長を促す為に、また私自身、脳を常に刺激するために新しい知識を吸収し続けずにはいられない性分であることが理由の一つです。しかし、それ以上に重要と考えているのは、今春から幼稚園に通い始める3歳の娘に知的財産を残すことです。彼女が通う園では、学習方法としてタブレットを使用しています。実際、彼女が20歳かもっと早い段階で、ロボットや多種多様なスマート端末と対話するようになるでしょう。私のブログ[sunao.co]が、娘が自分を取り巻く環境を理解できるようになる頃、また私がこの世にいなくなった後も、娘と私の世界観とを結び付ける役割を担ってくれることを願うばかりです。

さて、私の回顧録は一先ず置いておき、コンピューティングの歴史を簡単にご紹介しながら、今日のデジタル世界で何が起きているのかを見ていきましょう。簡潔な文章で、より多くの事を皆様にお伝え出来るように常に努めている為、無意識のうちに情報が省略されていることもあります。その点はお許し頂ければ幸いです。

ご存知のように、コロナの蔓延は私たちの社会的な交流を制限し、在宅勤務(テレワーク)、ビジネス会議の実施、講義の提供、教育や学習の場、コンサートの開催など、私たちは様々な集団活動においてデジタル手段を活用することを余儀なくされています。

1965年から1980年の間に生まれた私と同世代の人々は「ジェネレーション X (X世代)」とも呼ばれ、その前の世代である1946年から1964年の間に生まれた「ベビーブーマー」と呼ばれる人々と、20世紀後半以降のデジタル変革とともに成長しました。1980年代初頭から2000年の間に生まれた「ミレニアル世代」や、その後の「ジェネレーション Z (Z世代)」または「ポストミレニアル」と呼ばれる世代は、私達の世代に比べ、この変革への柔軟性ははるかに高く、デジタル端末をうまく使いこなすことができます。

1980年代の音楽業界において、レコードやカセットテープなどのアナログ機器から、CD (コンパクトディスク) などのデジタル機器への変化を我々は経験することになりました。CDは後に、ドライブを介してコンピューター内にソフトウェアやデータを保存、分配できるCD-ROMへと進化していきます。事実、CDの出現は、アナログからデジタルへの移行における重要なターニングポイントとなりました。

ご存知かもしれませんが、「デジタル」という言葉はラテン語の「指 (digitus)」という単語に由来し、古代の人々が物を数える方法として10本の指を使っていたことから派生した数的な概念です。その後、数字の1と0は、文章、音響、映像、グラフィック、その他の情報を変換し、モニターに映し出すためにコンピューターが使用するバイナリコードのベースとなりました。たとえば、バイナリコードではWATERという単語は次のように表されます。

01010111 【W】 01000001 【A】 01010100 【T】 01000101 【E】 01010010 【R】

上記のように、それぞれの数字のかたまりは大文字で書かれたアルファベットを表します

ビル・ゲイツが執筆した、パソコンの革命を説明した本“The Road Ahead”に書かれているように、アルファベットはバイナリコードで表すことができますが、このコードは、コンピューターがすべての情報を理解できるように二進数のデータに翻訳されるための〈言語〉なのです。

1950年代の終わりまでに、このバイナリコードはさらに改良され、英国数学者ジョージ・ブールの代数論理に影響を受けたアメリカの数学者、電気技師、暗号学者であるクロード・シャノンによって実用化されました。シャノンは1948年、後に大きな影響を与えることとなった“The Mathematical Theory of Communication” (邦題『通信の数学的理論』) を発表し、情報を測定する単位として「ビット」という用語を導入し、情報理論の父として知られるようになりました。

コンピューティングの分野における大きな発展である《チューリングマシン》は、シャノンの業績に影響を与えたと言えます。このマシンは、近代コンピューター科学と人工知能の基礎を最終的に

確立した英国の数学者、論理学者、暗号解読者であるアラン・チューリングが 1936 年に考案した、計算を行う自動機械の数学的なモデルで、コンピューターのモデルとなる仮想的な機械でした。この《チューリングマシン》には、入出力、CPU(中央処理装置)、ストレージ(外部記憶装置)などのコンピューターを構成する基本的な構成要素が含まれていました。

チューリングマシンが世に出回る前に、英国の数学者、哲学者、発明家であるチャールズ・バベッジによって 1837 年に開発された機械式汎用コンピューターの概念設計《解析機関》がすでにあり、これはコンピューティングの基本的要素を備えていました。1 世紀以上経ち、バベッジの《解析機関》は *Harvard Mark I* の開発においてコンピューティングの基本原則を提供することとなります。それ故、バベッジはメカニカルコンピューターの父と言われています。また、米国の物理学者で数学者のジョン・ヴィンセント・アタナソフは、1930 年代後半にアイオワ州立大学教授を務めていたときにデジタルコンピューターの発明に貢献した数少ない先駆者の 1 人とされています。

コンピューター開発のもう 1 人の重要人物は、数学者、物理学者、コンピューター科学者、エンジニア、博学者であり、*Harvard Mark I* で使用されているプログラム制作にも貢献したジョン・フォン・ノイマンです。彼は、「データの保存」と「命令の処理」に特に注意を払ってコンピューターの論理設計を行いました。ノイマンは 1945 年に発表した”First Draft of a Report on the Electronic Discrete Variable Automatic Computer \*1” (邦題『EDVAC に関する報告書の第一草稿』)の中で、数値(データ)と命令(指示)の両方が単一の記憶装置(メモリ)に格納される《プログラム内蔵方式》という新しいコンセプトについて述べました。また、十進法を使用していた前身の Electronic Numerical Integrator and Computer (ENIAC) \*2 とは異なり、EDVAC は、今日まで事実上すべてのコンピューターで使用されている基本的な符号化方式である二進法表記の先駆けとなりました。この新しい方式は《ノイマン型》として知られるようになり、現在でもコンピューター構造を理解するための参考として使用されています。

\*1 Electronic Discrete Variable Automatic Computer (EDVAC) : 最初期の電子計算機(コンピュータ)の一つ。その前身の ENIAC とは異なり、十進数ではなく二進数を使用しており、プログラム内蔵方式コンピューターとして設計された。

\*2 Electronic Numerical Integrator and Computer (ENIAC) : アメリカで開発された黎明期の電子計算機。

コンピューター開発への様々な知的貢献は、第二次世界大戦を背景に、あるいは英米政府が後援する防衛・学術研究関連事業のために行われたことを指摘しておきたいと思います。戦争中のイギリスの貢献としては、ドイツのエニグママシンからの信号を解読するために開発されたチューリングのボンベと、より高度なドイツ軍の暗号を解読するために開発されたトム・フラワーズのコロッサスであり、これは世界初のプログラム可能な電子デジタルコンピューターであると主張することができます。これらのマシンはいずれも EDVAC よりも数年前に作られたものですが、英国のブレッチリーパーク (General Communications Headquarter [GCHQ] の前身) のセキュリティが厳しかった為、これらのデジタルコンピューターについての情報が社会に出ることはなく、コンピューティング技術の発展に貢献したことはまだあまり知られていません。同じことが、1941 年にドイツで

作られたプログラム制御可能なデジタルコンピューターであるコンラート・ツーゼ Z3 にも言えますが、当時、ナチス政権はコンピューター技術が戦争にさほど役に立つとは考えておらず、1943 年に連合国の爆撃によって破壊されてしまいました。コンピューティング技術の開発における様々な努力は、ヨーロッパとソビエト連邦内の多くの国でも行われましたが、アメリカほど早いペースで進歩した国は他にありませんでした。

1950 年代初頭、企業が商業用コンピューターを開発・製造するようになると、コンピューティング技術は別の次元へと移っていきます。この時期には、巨大な機械であるメインフレーム・コンピューターが登場しました。このコンピューターは大規模な取引処理を行うことができましたが、非常に高価だったため、主に銀行や航空会社、科学研究機関、政府などの大きな組織で使用されていました。700/7000 シリーズ、特にシステム/360 シリーズの登場により、International Business Machine (IBM) はその後 30 年間、メインフレーム・コンピューターの製造と販売において圧倒的な存在となりました。

メインフレーム・コンピューターのシステムは【集中型】です。航空会社で取り扱われる予約情報などは、航空会社のコンピューター端末からの要求を受け、データを処理した後、コンピューター端末に送り返し、その情報をグラウンドスタッフがモニターの前で確認するといった流れとなります。

1971 年、コンピューターのソフトウェアプログラムの命令を実行することができる集積回路として、インテル社がシングルチップ・マイクロプロセッサ 4004 を開発し、これによってコンピューター業界は大きな転換期を迎えました。言い換えれば、それはコンピューターの中にある小型の頭脳と呼ぶことができます。このマイクロプロセッサは、1970 年代のマイクロコンピューター出現、特にアップル社のアップル II、コモドール社の PET2001、1977 年に人気を博したラジオシャック社の TRS-80 などの生産への道を開きました。

マイクロコンピューター市場の拡大を見越した IBM は、1981 年に IBM PC 5150 を発表し、これによってパーソナル・コンピューター (PC、以下「パソコン」) 時代が幕を開けることとなります。このモデルは、マイクロソフトのオペレーショナルシステム MS-DOS やインテルの 8088 プロセッサなど他社の部品を多く使用しており、従来のような自社で全ての機器を製造するスタイルから脱却するだけでなく、販売についても自社の独自ルートにこだわらず、様々な小売店を利用しました。このようにして、IBM は他社の開発者が自社のパソコンを製造することができるオープンな体制を作ったのです。

それまでは大企業や機関だけが利用していたメインフレームとは異なり、個人ユーザー向けに開発されたパソコンは一般消費者も利用できるようになりました。パソコンは、人々とコンピューターマシンとを結びつけたのです。そのおかげで、個々人が自分のデータを自身で管理し、文章を書く、オフィスの会計業務をコンピューター上で行うなどの職務を遂行できるようになりました。

またパソコンは、コンピューティング【分散】システムの発展を後押ししました。コンピューティング分散システムの例としては、家庭、オフィス、大学、産業界、その他の環境や地域などの物理的な空間内で、ローカルエリアネットワーク（同軸ケーブル）を介して相互に通信するパソコン（プロセッサ・メモリ）のグループが挙げられます。

1980年代後半から1990年代初頭にかけて、サーバーコンピューターがインターネットを介してクライアントコンピューターから要求された特定のタスクやサービスを実行する、いわゆる最初のクライアント・サーバー・システムの開発に伴い、メインフレームとパソコンは一体化しました。これにより、メインフレーム時代のグリーンスクリーンのダム端末に代わって、洗練されたグラフィカル・ユーザー・インターフェース\*3の展開が可能になりました。一言で言えば、「メインフレーム集中型コンピューティングシステムからパソコン分散型システムへの重要な進化をとげた」ということです。

\*3 グラフィカル・ユーザー・インターフェース(GUI)：マウスや指などで操作できる画面の事。

Windows や MAC などの操作画面は、GUI に該当する。ウィンドウやメニュー、アイコンなどが表示された画面を、マウスなどのポインティングデバイスで操作する。

この時期に初めて広く普及したもう一つの重要なテクノロジーは【仮想化】です。これは IBM のメインフレーム・オペレーティング・システム *MVS/VM* が先駆けでありながら、実際には IBM のミッドレンジ *System/38* と *AS/400* で初めて大規模に使用されました。仮想化は、同じコンピューター上で実行されている複数のアプリケーションを、それぞれのアプリケーションが専用のハードウェアとソフトウェアの一時的記憶装置を持っているかのように動作させることを可能にし、価格性能と信頼性を大幅に向上させました。仮想化は最終的にクラウド・コンピューティングの発展につながりましたが、これについては後で説明します。

コンピューター開発の次の大きなステップは、1989年にイギリスの科学者ティモシー・バーナー＝リーが欧州原子核研究評議会(European Council for Nuclear Research、通称 CERN)に勤務していた時に、ワールド・ワイド・ウェブ\*4を作成したことでした。一般的に、ワールド・ワイド・ウェブはインターネットと同義語として考えられていますが、厳密には意味合いが異なります。ワールド・ワイド・ウェブの前身である高等研究計画局ネットワーク (Advanced Research Projects Agency Network、通称 ARPANET)がネットワーク内のコンピューターを接続するための通信メカニズムとして Transmission Control Protocol / Internet Protocol (TCP/IP)を取り入れたときにはすでにインターネットという言葉は存在していましたが、この出来事を境に、インターネットという言葉が広く使われ始めることになりました。

\*4 ワールド・ワイド・ウェブ:世界中にクモの巣(web)のように張り巡らされた情報ネットワークのことで、インターネットを指す場合もある。

ARPANET は米国国防総省から資金援助を受け、軍事・科学目的の広域なコンピューターネットワークを構築するために1966年に設立されました。1969年までに、ARPANET はカリフォルニア大学ロサンゼルス校(UCLA)とスタンフォード研究所(SRI)にある2台のコンピューター間で電子メー

ルを送信することに成功し、1969年12月にはカリフォルニア大学サンタバーバラ校とユタ大学にある2台のコンピューターがこのネットワークに加わりました。このようにして、1969年は電子メールの誕生年となりました。ARPANETは、1985年から1995年まで機能していた国立科学財団ネットワーク(National Science Foundation Network、通称NSFNET)を含め、彼らのネットワークを米国内の他の軍事機関や研究機関にも拡大していきました。NSFNETは1995年にワールド・ワイド・ウェブが完全に商用利用へ移行する際に重要な役割を果たしましたが、コンピュータ・ネットワーク・プロジェクトの草分け的存在だったARPANETは1990年に廃止されました。

ワールド・ワイド・ウェブの商用利用は、世界中すべてのコンピューターの接続を可能にし、1990年代に広く利用された構想(もともとはアル・ゴア元米国副大統領によって提案された構想)だった情報スーパーハイウェイ\*5を作り出しました。このように、インターネットが出来てから最初の数年間、特に1990年代の後半には、電子メール通信の発達、Amazonによる書籍のオンライン販売が先駆けとなった電子商取引の出現、個人および商用のウェブサイトのまん延、ウェブを閲覧するためのNetscape NavigatorやInternet Explorerのようなウェブブラウザが作り出されるなど、インターネットが生み出した多くの変化を私たちは目の当たりにしました。

\*5 情報スーパーハイウェイ(構想):元々はアメリカ合衆国の全てのコンピューターを光ケーブルなどによる高速通信回線で結ぶという構想であるが、いつの間にか、民間を中心に整備したインターネットの普及が、「情報スーパーハイウェイ」の構想を体現したものとして理解されるようになった。

2001年に3G携帯電話ネットワークが導入されたことにより、スマートフォンの技術は劇的に向上し始めました。3Gネットワークは、携帯電話とインターネットのワイヤレス接続を可能にし、より優れたマルチメディアとデータ容量、より高速なデータ転送、他のアプリケーションのサポートの提供が出来るようになりました。このことは、アップル社のスマートフォンであるiPhone誕生(2007年)のきっかけとなり、スマートフォン業界全体に革命をもたらしました。事実、人々がノートパソコンやデスクトップコンピューターからインターネットを閲覧するのと同じように、iPhoneを使えば、どこにいてもインターネットを閲覧できるようになりました。言い換えれば、iPhoneはインターネットに接続された小型のモバイルコンピューターとなり、消費者の利便性を向上させる多くのアプリケーションを提供したのです。

インターネットに接続された数百万ものコンピューター、タブレット端末、携帯電話、スマートフォン、その他のコンピューティングデバイスが大量のデータ転送量を生み出した結果、2006年にクラウド・コンピューティング\*6と呼ばれる新しいパラダイムが登場しました。このクラウド・コンピューティングは膨大な量のコンピューティングパワーとコンピューターメモリ、および爆発的に増加したアプリケーションを管理しています。

\*6 クラウド・コンピューティング:コンピューティング資源(ソフトウェア、ハードウェアなど)をインターネットなどのネットワークを介して共同利用するシステム。利用者はネットワーク端末さえあれば、世界のどこからでも必要なコンピューター処理が可能になる。インターネットのネットワークを雲に例えてcloudと呼んでいる。

クラウド・コンピューティングを説明するために、皆様に想像を働かせて頂きたいのですが、コンピューティング・サービスを備えた【倉庫（クラウド）】が多数存在する【大通り＝情報スーパーハイウェイ（インターネット）】をイメージしてください。次に、個人や企業がこの通りを移動（ブラウジング・閲覧）し、これらの倉庫（クラウド。代表的なものは Google、Amazon、Microsoft など）に立ち寄って、コンピューター・インフラ（サーバ、ストレージ、OS など）やアプリケーションを開発するためのコンピューター・プラットフォームを購入したり、または単にアプリケーションを購入したりすることを想像してみてください。要するにクラウド・コンピューティングとは、コンピューティングパワーを集中化（一元化）し、個人や企業に対し、彼らのリクエストやニーズに応じたあらゆるタイプのコンピュータサービスを提供するエコシステムであると言えます。

クラウド・プロバイダーは、数百万台のコンピューター、スマートフォン、その他のコンピューティングデバイスと相互作用するリモートおよびビッグデータ・センターを提供しています。あなたがスマートフォンを使うたび、情報を検索したり保存したりするために、パブリック、プライベート、ハイブリッド（パブリックとプライベートの組み合わせ）のいずれかのクラウドとやり取りを行っていることとなります。このシステムは、より迅速な技術革新、優れた柔軟性、スケールメリット、さらには人工知能や機械学習機能を可能にするため、企業や個人のニーズにうまく適応しています。

現在、クラウド・コンピューティングは 10 億ドル規模のビジネスとなっており、2020 年の収益は Microsoft が 595 億ドルで No.1 ベンダーとなり、続いて Amazon が 452 億ドル、Google が 130 億ドルだったと、ボブ・エヴァンス氏は 2021 年 2 月 8 日に投稿した記事『マイクロソフト、2020 年のクラウド収益でアマゾンに圧倒、AWS とグーグルを合わせた額を上回る』の中で述べています。

前述の様に、クラウド・コンピューティングの優位性は非常に高いと言えます。しかしながら、これとは真逆の動きが起きていることも事実です。自動運転車や船舶、無人機（ドローン）、ロボットなどのスマートデバイスや機械はコンピューターによって操作されており、完全な自律性を備え、その直近の状況から収集したデータに基づいて、感知、推論、意思決定を自身で行える能力を持っています。その為にこれらの機器は、コンピューティング能力、ストレージ、アナリティクスが、個々のデバイスや機械本体に組み込まれていなければなりません。

この新しいコンピューター・アーキテクチャ\*7 は『エッジ・コンピューティング』と呼ばれ、クラウド・コンピューティングとは異なる【分散型】です。エッジ・コンピューティングは、リアルタイムに意思決定が行えるコンピューティングのモデルで、自動車の自動運転のような特殊な機能を遂行することができます。データセンターや処理能力はクラウド内だけでなく、デバイスや機器本体にも含まれています。ピーター・レヴァイン氏はエッジ・コンピューティングを「自動車は車輪がついたデータセンターになり、ドローンは翼を持つデータセンターとなる。船は浮遊するデータセンターになり、ロボットは腕と脚を持つデータセンターとなる。」とプレゼンテーションの中で説明しています。

\*7 コンピューター・アーキテクチャ：コンピュータ（特にハードウェア）における基本設計や設

計思想などを意味する。アーキテクチャ（建築）には、単に「建築物」以外に、設計や様式という意味があるが、それから転じて、コンピューター分野においても使われるようになった。

「設計思想」などと意識されることもある。技術者や研究者の用語としては（企業ごとの用語の違いにもよるが）「方式」という語が使われることもある。

エッジ・コンピューティングのようにローカライズされたデータセンター（すべてのデバイスや機器の中にある）は機械学習をさらに高めるために、関連する情報を収集し、フィルタリングし、クラウドに配信します。この事実から分かるように、クラウドが必要なくなったり、主要な機能を失うことはありません。それどころか、マシンやデバイスの性能を高める為に、クラウドはエッジとの間で継続的なフィードバックを繰り返します。一言で言えば、エッジ・コンピューティングは、クラウド・コンピューティングの競争相手ではなく、互いに補完するものなのです。

コンピューター、タブレット、スマートフォンなどのデバイスにおけるクラウド・コンピューティングは、過去 15 年間で 10 億ドルのビジネスを生み出しました。業界アナリストやコンサルタントは、IoT デバイスの次の波はエッジ・コンピューティングであり、直近数年間で 1 兆ドルのビジネスになると信じています。

御礼：

アジア太平洋地域にサービスを提供する IT コンサルティング会社である Alan Kei Associates のマネージング・パートナーである Julian Lloyd 氏に、本記事を執筆するにあたり多大なご協力を頂きましたことに心より感謝の意を表します。

訳：畑田紋奈

各注記、説明については [Wikipedia] [コトバンク] [IT用語辞典] を参照しています。