

System zのテクノロジー変遷

メインフレームが残してきたイノベーションの軌跡

50周年を迎えたSystem z。基幹システムとして稼働を続けるメインフレームの歴史は、社会インフラを支えてきた重責と苦闘の50年でもあります。コンピューターの黎明期から世界中のお客様にご採用いただく中で、種々のトラブルを経験し、ビジネスに適合させるためにさまざまなご要望をいただきながら、品質改善や機能拡張を重ねてきています。そこから生まれた多彩なテクノロジーが、現在のITにおける礎になっているのは間違いありません。

本稿では、System zにおける50年のテクノロジー変遷を振り返ることで、それぞれの技術の登場背景や、現在の最新システムへの継承について省察します。これにより、なぜSystem zが長命であるのか、そしてこれからどこへ向かうのか、技術的視点から推察できるものと考えます。

▶▶ System/360登場の背景

IBMが最初の商用コンピューターを発表したのが1952年のIBM 701で、これがIBMメインフレームの起源だと言われています。真空管で作られたプログラム内蔵方式の大型コンピューターで、科学技術計算に用いられました。その後、主に事務処理に用いられた中型コンピューターIBM 1400シリーズや、スーパーコンピューターIBM 7030(通称Stretch)など、テクノロジーの進歩と相まって、用途に応じて選べるようにシステムの種類が増えていきました。しかしながら、購入する側からすれば、業務特性ごとに異なるシステムが必要になり、互換性のない複数のシステムが乱立してしまうため、1台でなんでも処理できる汎用コンピューターが求められました。

1961年秋から「IBMの今後の10年間の開発と製造の方向性を決定する」ための調査チームとして12名のSPREADタスクチームが組織され、1961年末に経営層にレポートが提出されました。これがSystem/360(以下、S/360)の企画書そのものであり、互換性やファミリーの概念、命令セット・アーキテクチャー、最新テクノロジーの採用方針、I/Oの標準インターフェース、モジュール設計、オペレーティング・システムといったS/360の基本概念が、このレポートの中で提案されています[1]。

SPREADチームが中心となって開発されたS/360は、1964年に発表されました。商業計算と科学技術計算の両方に使用できる命令セットを装備し、船のコンパスのように全方向360度の処理が可能なシステムとして、“System/360”と名付けられました。現在の最新メインフレームSystem zは、S/360の基本概念を継承しており、時代の変化に合わせて、あらゆるニーズに応える努力を続けています(図1)。

▶▶ S/360アーキテクチャー

元来は建築用語である「アーキテクチャー」という言葉が、S/360開発の際に初めてコンピューターにおける設計思想や概念的な構造を表現する言葉として用いられました。S/360開発のアーキテクトの一人であるGene M. Amdahl氏は、アーキテクチャーを次のように定義しています。

“The attributes of a system as seen by the programmer, i.e., the conceptual structure and functional behavior, as distinct from the organization of the data flow and controls, the logical design, and the physical implementation.”
(「アーキテクチャーは、データの流れ、制御、論理設計、物理

実装などの構成とは別の、概念的な構造や機能動作など、プログラマーから見えるシステムの属性を示すもの」)[2]

アーキテクチャーを定義し、インターフェースを明確にして仕様を公開することで、リファクタリングが可能になりました。リファクタリングとは、「外部から見た動作を変えずに内部を変更すること」ですが、半導体技術など進歩の速いものを互換性を維持したまま取り込めるなど、より良いものを素早く組み合わせることができるようになりました。このようにアーキテクチャーを公開して標準化を進め、機能単位(モジュール)を組み合わせる構成するアプローチは「モジュール化」と呼ばれ、S/360が史上初のモジュール化の事例であると言われています[3]。

S/360では、アーキテクチャーを明文化して“IBM System/360 Principles of Operation”というマニュアルを公開しました[4]。このPOマニュアルは、現在のSystem zでも版を重ねて出版されており、アーキテクチャーを公開するという方針を貫いています。

なお、S/360アーキテクチャーは約10年周期で拡張され、S/360(1964)、S/370(1972)、S/370XA(1981)、ESA/370(1988)、S/390(1990)、zArchitecture(2000)と発展してきました(図1)。2010年からは複数のアーキテクチャーを一体化したzEnterpriseハイブリッド・アーキテクチャーに拡張されています。

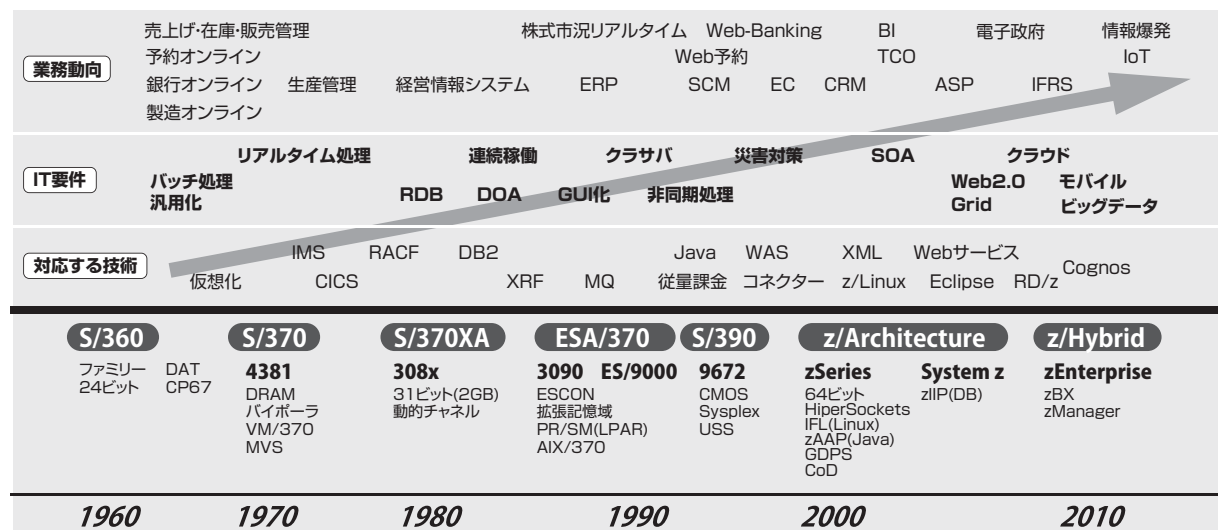
▶▶ マイクロコードの採用

モデル・ファミリーと互換性を実現する上で、最も効果があったのがマイクロプログラム方式(マイクロコード)の採用です。1958年のIBM 709で初めてマイクロコードが実装されましたが、S/360ではハードウェアとソフトウェアの進歩の速度差を吸収するために、マイクロコードを採用しました。マイクロコードは、ハードウェア内に組み込まれたソフトウェアですが、命令セット・アーキテクチャーを実装する上で、ハードウェア機能をエミュレートすることができます。そのため、高価な回路をエミュレートすることで、低速ながらも安価にシステムが実現でき、高価なシステムとの互換性も担保できました。また、新技術を採用するときにはマイクロコードで差異を吸収することで互換性を維持できます。これにより、性能と価格からモデルを選べるというファミリーの概念と、新技術を搭載してもソフトウェアに影響を与えない互換性を実現しています。

▶▶ S/360のプロセッサ

CPUチップ技術には、従来のトランジスタ技術を発展させたSLT(Solid Logic Technology)という実装モジュールが採用されました(図2)。当時すでにモノリシック集積回路(IC)の技術も発明されており、採用が

図1. IT動向とIBMメインフレーム



検討されましたが、これを使えば高集積かつ劇的な高速化を実現できるものの、当時は品質が悪く不安定であったため、製品の完成が3年以上遅れるという検討結果が出ました。SPREADレポートによる開発方針では、Time-to-Market(いかに市場に素早く製品を投入するか)を優先することになっており、どんなに素晴らしい最新技術であっても、開発プロジェクトが大幅に遅れることは許されませんでした。このTime-to-Marketを優先する方針は、現在でもIBMの開発ポリシーとして継続されています。なお、モノリシック集積回路であるLSIを採用したのは、S/360から6年が経過したS/370からになります。

当時のプロセッサは、CPU回路内で高速化のためのさまざまな工夫をしています。CPU内のレベル1キャッシュ、レジスター・リネーミング機構による命令アウト・オブ・オーダー(Out-of-Order)実行、メモリー・エラーを自動修正するECCメモリー(Error Checking and Correction)など、いずれも1960年代のS/360で実装されたものですが、これらがメインフレーム以外のサーバーで搭載されるようになったのは、その後20年以上経過してからです。

アドレッシングは、24ビットで行われ16MBまで連続的にアクセスができました。S/360開発当時は、何ビットにするかで喧々諤々の議論がありましたが、24ビットあれば当面は不足しないであろうということで決められたようです。S/360発表から17年後の1981年、S/370XAのときに31ビット(2GB)が追加され、さら

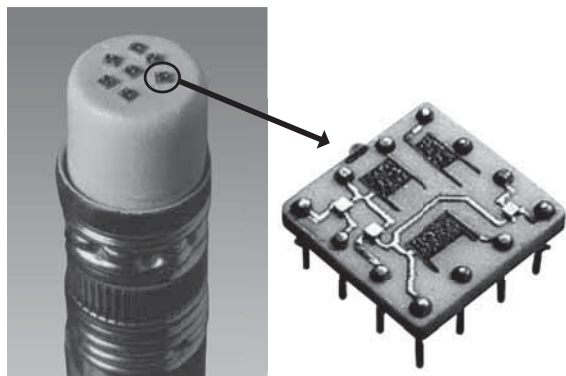
に19年後の2000年にzアーキテクチャーで64ビット(16EB)が追加されました。約20年の周期でアドレス幅が拡張されてきたことになります。

命令セットはCISC(Complex Instruction Set Computer)で、当初は143種類の命令が定義されました。S/360発表から50年が経過し、最新のzEC12では命令数が1,100種類を超えていますが、今までに一つたりとも命令を削除しておらず、完全な互換性を維持したまま機能拡張を続けています。アドレッシングの継承と命令セットの維持が、ソフトウェアの互換性を担保しており、これが50年も長生きできている技術的根拠であると考えられます。

▶▶ S/360の主記憶装置

S/360で実装された主記憶装置は、当初は磁気コアメモリーでした(図3)。その後、1970年発表のS/370モデル145からは、ICメモリーとしてDRAM(Dynamic Random Access Memory)を搭載するようになり、現在に至っています。なお、DRAMは1971年に発売開始したインテル社による発明だと誤解されがちですが、1967年に発明して特許を持つのはIBMワトソン研究所のRobert H. Dennard氏です(81歳になられた2014年現在も現役のIBM社員です)。その後、IBMは世界有数のDRAMメーカーになりましたが、1999年にはDRAM事業を東芝に売却しています。

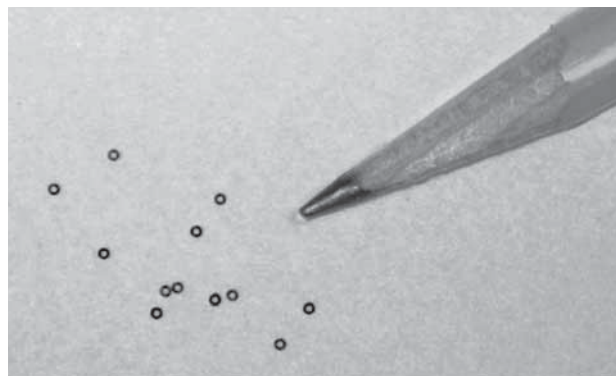
図2. S/360のSLT



消しゴム鉛筆に乗っているごみのようなものがSLT。

その1個を拡大したもの。

図3. 磁気コアメモリー



鉛筆の先のドーナツ状のものがコア。このコアに磁化用の線を巻きつけ、アドレス線をコアを縫うように編みコアメモリーを作ります。出来上がったコアメモリーは網状になります。

▶▶ S/360チャンネルの登場

CPUに比べてかなり低速なI/O処理をCPUが直接制御すると、速度差による無駄が生じます。このため、I/O処理を専用に行うチャンネルが開発され、CPU処理とI/O処理を分離し並行して動作できるようにしました。S/360ではサブチャンネルが導入され、1台のチャンネル装置で複数のI/O装置を同時に処理できるような設計にしました。

よく「メインフレームはI/Oが強い」と言われますが、その最大の理由は、I/Oチャンネル機構にあります。チャンネルはCPUとI/Oを並行処理できるだけでなく、エラー検知やリカバリー処理、タイムアウト検知やマルチパス制御、優先度制御、ロードバランスなども行います。チャンネルとI/O装置の間は複数パスで接続しますが、あるチャンネルパスで障害が発生しても他のパスで処理を代替するなど、フォールト・トレラントも実現しています。このように、ハードウェア内でI/Oをインテリジェントに処理する設計は、I/O装置が多くなってもCPUに余計な負担を与えず、高負荷でも安定的に処理できる堅牢性にも寄与しており、メインフレームの特徴の一つになっています。

▶▶ S/360のオペレーティング・システム

S/360用のオペレーティング・システムとして、OS/360が開発されました。1960年代は、業務に使える計算機はメインフレームしかなく非常に高価であり、システム資源を100%使い切るという発想が当たり前でした。また、処理方式はバッチが中心でしたが、オンライン業務の登場により、応答時間を重視するオンラインと、スループットを重視するバッチの混在を、限られたハードウェア資源で効率良く処理するために、OSは重要な役割を果たすようになりました。

OS/360の開発には紆余曲折がありました。S/360開発のアーキテクトの一人、Frederick P. Brooks氏がOS/360開発のリーダーを務めました。2000人規模での開発は、ソフトウェア史上初の大規模プロジェクトであり、さまざまな人間系のトラブルに遭遇しています。ここでのプロジェクト経験を、Brooks氏は『人月の神話』という本にまとめており、ブルックスの法則を導き出し

ています[5]。

▶▶ 仮想化の起源

1965年に発表されたS/360モデル67では、マルチプロセッサと物理分割をサポートしました。しかし物理分割では、システム資源の動的な配分や共用ができないため、資源効率が悪く柔軟性に欠けていました。

また、モデル67では、DAT (Dynamic Address Translation) を搭載しており、仮想記憶をサポートしました。それを活用するOSとして、1967年にCP67が登場しました。CP67は、CPU、メモリー、I/Oのすべてを完全に仮想化した仮想マシンを定義し、1台のシステム上で複数の仮想システムを動かすことができました。これが仮想化技術の起源です。その後、CP67は製品化され、1972年にVM/370として、世界初の仮想化技術製品が発表されました。これは現在のz/VMに継承されています。仮想化により資源効率は格段に改善されましたが、当時はエミュレーションによるオーバーヘッドが大きく、安定性に欠けていました。VM/370の登場から20年間は、さまざまなチューニングをハードとソフトの両面から施してきており、現在ではほとんどオーバーヘッドがなく堅牢な仮想化が実現しています。

1988年に、VMをマイクロコード化してハードウェアに組み込んだPR/SM (Processor Resource/ Systems Manager) が登場しました。PR/SMはハードの中で論理分割機能 (LPAR) を提供するもので、1台を複数の区画に分割し、複数システムとして稼働させることができます。ただし、資源を共有して分割した場合、資源効率は高まりますが、仮想システム間の干渉やセキュリティ上の脆弱性が問題になります。つまり、区画の独立性がどの程度保障されているかが重要です。最新のSystem zに搭載されるPR/SMは、この課題に対処しており、結果として商用システムのレベルを超え、軍事レベルの採用基準となるEAL5+ (Evaluation Assurance Level) の認証を受けています。

なお、PR/SMの技術は、1997年にPOWERアーキテクチャーに転用され、当時のAS/400やPOWERサーバーにLPARが実装され、現在のPowerVMに受け継が

れています。

▶▶ セキュリティー

S/360の仮想化技術とタイムシェアリングにより、多くのユーザーが同時にアクセスできるようになりました。アプリケーションのバグなどによって他のアドレス・スペースにアクセスする、あるいは他人のアプリケーションを起動してしまうなど、いろいろな事件が起きました。問題が起こるたびに、後追いでセキュリティー機能を追加していたのでは埒が明かないため、S/360開発チームは、最初からセキュリティーを設計思想に組み込むべきであると判断しました。1973年に“IBM System Integrity Statement”を発表し、ハードとソフト、アプリケーション、運用までを含めたシステム全体の完全性を実現するために、メインフレームに関連したすべての製品や機能に設計段階から一貫性を保つことを約束しました。そして2014年現在でも、z/OSはこのコミットメントを守っています。メインフレームは、IBMが1社でハードとソフトを一気通貫で開発する垂直統合型のビジネスモデルであり、故にシステム・インテグリティをコミットする責務があると考えます。

▶▶ RASと並列シスプレックス

1970年のS/370発表のときに、RAS (Reliability: 信頼性、Availability: 可用性、Serviceability: 保守性)

という言葉を使用して、システムの信頼性に対する考え方を示しました。その後は、RAS機能を追加し続けて現在に至っており、高信頼性はメインフレームの最大の特徴になっています。

しかし、どんなにRASを強化しても、単一システムでは保守のための停止は避けられず、障害による計画外停止だけでなく、保守のための計画停止を回避するためにも、最低でも二つのシステムを用意する必要がありました。このような高可用構成はホットスタンバイ・システムと呼ばれ、1970年代から構築されてきましたが、スタンバイ側のシステムがほとんど使われないため、コスト適正化において課題がありました。

これを解消する技術として、並列シスプレックス (Parallel SYStem comPLEX) が1994年に発表されました (図4)。パイポーラーからCMOSプロセッサに世代交代したときに、当時のCMOS技術では性能不足が顕著だったことから、並列シスプレックスは性能向上を目的として開発されましたが、クラスター構成と負荷分散技術は可用性向上の効果も得られました。結合機構 (CF) を使用してメモリーを共有し、すべてのシステムでDASDを共有しており、全ノードがアクティブ状態で処理を行うのが並列シスプレックスの大きな特徴です。また、並列シスプレックスを拡張してリモート・クラスター化したものがGDPS (Geographically Dispersed Parallel Sysplex: 広域分散並列シスプレックス) であり、これにより災害対策を考慮した究極の無停止システムが構築可能になりました。

図4. 並列シスプレックスの概念図

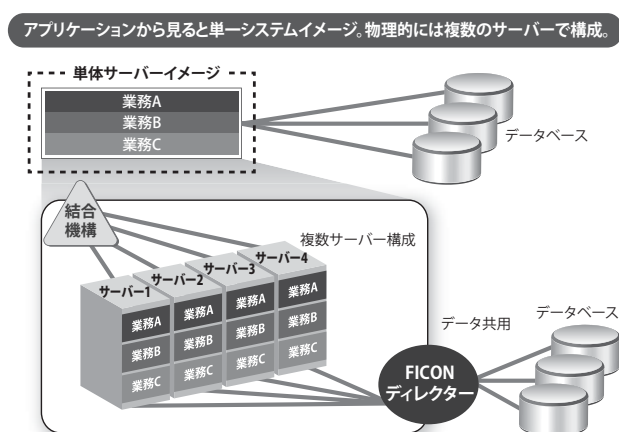
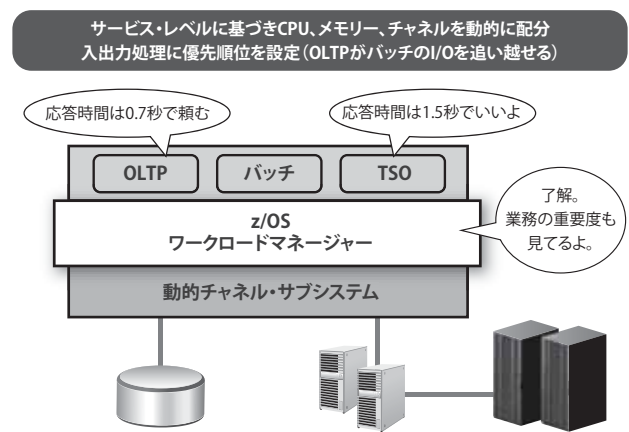


図5. ワークロード・マネージャー



ワークロード管理

さまざまな業務アプリケーションをメインフレームで稼働させるとき、それぞれの業務の要件を満たすように実行される必要があります。しかし、システム資源は有限なため、各所で競合が発生し、アプリケーションが多くなるほど調整は難しくなります。こうしたアプリケーション負荷のことをワークロードと呼びます。

メインフレーム上で並行稼働するワークロードを自動最適化する機能として、1994年にWorkload Manager (WLM) for MVS/ESAが登場しました。ドイツIBMとテュービンゲン大学の共同研究で考案されたニューラル・ネットワークのアルゴリズムを採用しており、それぞれのアプリケーションの要件をポリシーで定義し、ルールに基づいて稼働データを見ながらゴールモードで動的最適化を行い、ワークロードごとの優先度を自動調整します(図5)。これにより、今まで人手でチューニングしていたものが自動化され、運用負担は大幅に軽減されました。

さらにWLMを複数LPAR環境まで拡張したものが2001年に発表されたIntelligent Resource Director (IRD)です。これによりSystem z上のLinux環境にも対応しました。また、2010年にハイブリッド・アーキテクチャーになることで、WLMによる自動最適化の機能はUnified Resource Managerにも反映され、z/OSのみならずPowerやx86環境まで拡張されました。この考え方は、2013年に発表されたSoftware Defined Environment(SDE)にも受け継がれています。

そしてハイブリッドへ

S/360の汎用機思想は、現在でも維持されています。1988年にはAIX/370が発表され、メインフレームでUNIXが稼働できるようになりました。1993年にはMVS上のUNIX機能であるMVS/ESA OpenEditionが登場し、現在のz/OSではUNIX Systems Servicesという名前で標準搭載されています。1999年末には、S/390用のLinuxカーネル・パッチが公開され、メインフレームでLinuxをサポートしました。そして2010

年、zEnterprise BladeCenter Extension(zBX)が発表され、POWERプロセッサやx86プロセッサがメインフレームでサポートされるようになり、AIXやWindowsまでのメインフレーム上での一体運用が可能になりました。

System zの真髄とその価値

S/360で定義された設計思想は、モジュール化によってリファクタリングを可能にし、高度なサステナビリティ(持続可能性)を実現しました。プロセッサ技術、メモリー技術、I/O技術、OSなど、どれを見ても近年主流のテクノロジーの多くが、S/360から生まれたものです。System zは、現在でも年平均1,000億円の開発投資を継続しており、IBMのフラッグシップ・マシンとして、今後も先端テクノロジーによるリファクタリングを続けて、市場のニーズに合わせた効率的なシステムとして発展を続けます。

世界中の主要な公的機関や企業の基幹システムとして稼働しているSystem zは、今後も高度に発達していくIT社会において絶対になくなるものではなく、50年後も存在していると確信しています。

【参考文献】

- [1] Chunk Boyer, "The 360 Revolution", IBM Corp. 2004
- [2] G.M.Amdahl, G. A. Blaauw, F.P.Brooks, "Architecture of the IBM System/360," IBM Journal of R&D, Vol.8, No.2, April, pp.87-101, 1964.
- [3] C.Y.Baldwin, Kim B. Clark, "Design Rules - The Power of Modularity", The MIT Press, 2000
- [4] "IBM System/360 Principles of Operation", IBM Corp. 1964
- [5] F.P.Brooks, 「人月の神話」,ピアソン,2002 (新装版2010)



日本アイ・ビー・エム株式会社
システム製品事業
システムズ&テクノロジー・エバンジェリスト

北沢 強
Tsuyoshi Kitazawa

1989年、日本アイ・ビー・エム入社。サーバーセールス事業部に所属。大和研究所でメインフレーム開発、システム研究所でメインフレームの日本語対応を経験後、1999年にLinuxをメインフレームにポーティングするプロジェクトに参加。以来System zの技術セールスとして200社以上のお客様システムに関わった。2006年よりSystems & Technology エバンジェリストとして活動している。