

Discussion Paper Series, No.028
Research Center for Innovation Management,
Ritsumeikan University

IoT 時代に向けたレガシーからの転換

テクノロジー・マネジメント研究科・准教授
高梨 千賀子

2017 年 3 月



立命館大学イノベーション・マネジメント研究センター
Research Center for Innovation Management, Ritsumeikan Univ.

〒567-8570 大阪府茨木市岩倉町 2-150
2-150 Iwakura-cho, Ibaraki, Osaka 567-8570 Japan
<http://www.ritsumeikan.ac.jp/acd/re/ssrc/org/imrc.html>

- ※ 本ディスカッションペーパー中、意見にかかる部分は著者によるものであり、立命館大学イノベーション・マネジメント研究センターの見解を示すものではない。
- ※ 引用・複写の際には著者の了解を得ること。

IoT 時代にむけたレガシーからの転換

要旨：本稿はレガシーシステムからの転換における課題解決について考察した。取り上げた事例は、FA メーカーのオムロン社である。同社は主力製品であるコントローラにおいて、従来のハードウェア中心のアーキテクチャからソフトウェア中心のアーキテクチャへ転換を図り成功した。これは来るべき IoT 時代において同社に多くのビジネスチャンスをもたらすものと考えられる。本稿は、オムロン社の事例を、技術システム、知識蓄積、資源動員の正当化の観点から分析した。その結果、1)SW 開発が適切に焦点化装置として機能していたこと、2)採用した国際規格がマイグレーションパスとして機能したこと、3)アーキテクチャの転換に際して必要とされる新たな知識を社内外から適切に導入したこと、4)資源動員については、理由の汎用化と既存および新規の特定支持者から認知されたことが正当化につながったこと、がオムロン社の成功の要因であると考察した。

キーワード：レガシーシステム、IoT、アーキテクチャ、ハードウェア、ソフトウェア

1. はじめに

本稿は、事例研究である。テーマは、既存のメカニカルなハードウェア・アーキテクチャから新しいソフトウェア・アーキテクチャへの転換である。ごく当たり前に聞こえるデジタル化の進展を背景にしたこのアーキテクチャ・シフトに関するテーマは、実は、IoT時代に従来の競争力を継続できるかどうかの1つの重要なポイントとなりうると考えられる。

IoT の一つの大規模な取り組みとして各種メディアが取り上げている Industrie4.0 は、ドイツのハイテク戦略 2020 行動計画」の中に位置付けられる国策で、ICT 技術の製造業分野への統合を目指すものである¹。この「生産革命」においては、産業発展を4段階に分けている。最初のフェーズ (Industrie1.0) は、18 世紀終わりの産業革命で、所謂、蒸気機関という動力源を得た機械化である。第2フェーズ (Industrie2.0) は大量消費を支える大量生産システムの登場 (20 世紀初頭)、そして、第3フェーズ (Industrie3.0) はエレクトロニクスと IT 技術を活用した自動化 (1970 年代の初め) である。第4フェーズ (Industrie4.0) は、CPS (Cyber-Physical System) を基盤に置いた新たな産業革命であり、現在は、この第3フェーズから Industrie4.0 への移行期であると位置付けられている (Industrie4.0 Working Group による Recommendation)。CPS とは、工場システムで言えば、コントローラや工作機械などの各種デバイス (Physical System、物理空間) と高度な解析能力を持つコンピューティング技術 (Cyber System、サイバー空間) を通信ネットワークで結んだ「情報を自動的に交換し合い、自律的に動作や制御を行うことが可能なシステム」²を指す。一般にはスマート工場というイメージであるが、ネットワークで結ばれる範囲は工場内にとどまらず、設計から製造・生産へのエンジニアリングチェーンのシームレスな統合 (Vertical Integration)、原材料の仕入れから販売・マーケティングへのバリューチェーンのシームレスな統合 (Horizontal Integration)、そして工場とビジネスプロセスとの連携を目指すものであり、そのシームレスな統合は、従来の系列や取引ネットワークを超えると想定されている。ポイントは「シームレス」「全体最適」である。現在では、設計と生産現場で用いるソフトウェア (以下、SW) が異なったり、ネットワーク化が限定的であったりして、必ずしもシームレスには繋がっていない。1つの工場の中でも、情報が自動的に取戻され、解析されて、自律的に制御や作業が行われているわけでもない。また、最適化はある一定範囲で実現されている個別最適であって、全体最適ではない。このような現状から、シームレスな範囲が企業を超え、さらに全体的に最適化される姿が描かれて

いる。

しかしながら、個々の企業にしてみれば、如何にして第 4 フェーズへの移行の波に乗るかは大きな課題である。第 3 フェーズで蓄積されてきた知識や技術、問題解決の方法、組織の在り方、さらには、企業間関係、産業生態系といった「長年使われてきた資産 (Legacy System)」が必ずしも引き継がれない可能性があるからである。新システムへの移行期においてそれまで築き上げてきた競争優位が維持できなくなるという企業の姿は、アナログからデジタルへの移行、磁気記憶装置から光記憶装置への移行、ガラケーからスマホへの移行など、これまでの歴史の中で幾度も繰り返し観察されてきた。

この古くて新しい問題が IoT 時代にことさら重要になっていると考えられる理由が 3 つある。1 つは、変化の速さである。スマート製品、ビッグデータ、解析技術、AI など、IoT を構成する重要な要素における技術革新は 5 年前には想定できなかった。2 つ目は、変化のもたらすインパクトの大きさである。ビッグデータに見るように、今までデジタル化されなかったものがデジタル化されることで生み出される情報の価値は非常に大きい。CPS 構築にはそういった情報の取得が重要になる。我々は、情報を巡る競争が異業種をも巻きこんでいることを目の当たりにしている。サービス業の Google が移動体通信分野や自動車分野に参入し、マイクロソフトが BtoC 製品だった Windows を BtoB に展開するほか、クラウドサービスも提供している。いずれの場合も、今までアクセスできなかった現場（使用環境）の情報を入手することにより CPS を構築、新たなサービスを展開している例とみることができる。この背景には、デジタル化の進展により、従来ハードウェア（以下、HW）が実現していた機能が SW で実現できる幅が広がっていることがある（小川、2015）。こうした状況は付加価値のシフトをもたらし、産業生態系を大きく変化させつつある（妹尾、2017；小川、2015）。最後は、このような従来とは異なる競争が、日本の製造業の強みに与える影響である。日本の優れた工場管理に関する情報が工場の種々デバイスから上がってくる。それを誰が、どのレイヤーで収集し解析を通してサービス提供していくのか。そのためにどのような CPS を構築していくのか。これまでの業種を超えて、模索されている。この状況下では、日本モノづくりの強みに大きな影響が出かねない。現在、我々が目の前にしている IoT は、以前の IT ブームとは異なり、一企業の枠をはるかに超えるものなのである。

このような問題意識の下、本稿では特に、コア製品の技術アーキテクチャを大きく転換した事例を取り上げる。具体的には、ファクトリーオートメーション (FA) を手掛けるオ

オムロン社によるプログラマブル・ロジック・コントローラ（PLC、以下、コントローラと呼ぶ）Sysmac NJ シリーズの開発の事例である。FA におけるコントローラは、上述の第 3 フェーズをけん引した製品である。PLC は工場システムの末端デバイスを制御する、所謂、司令塔であり、コントローラメーカーの技術の粋を集めた製品である。しかしながら、多くが ASIC というセミカスタマイズされた半導体技術をベースに技術システムが設計されており、コンピュータでありながら非常にメカニカルなアーキテクチャを持っている。そのパフォーマンスが限界に近付いている。オムロン社では、IoT が大きく注目される前の 2008 年より新しいコントローラアーキテクチャの開発に取り組み、3 年の月日を経て 2011 年、製品化に成功した。しかしながら、この製品群がユーザに広く受け入れ始めたのは、ごく最近のことである。IoT への関心が高まり、SW をベースにした新アーキテクチャの真価が評価されるようになるとともに、低価格のワンボックス製品へ製品ラインを拡大したことが功を奏した。現在、既存製品からの買い替えに弾みがつき、経済成果が目に見える形になってきている。しかし、重要なのは、オムロン社がこの 2008 年という早い段階で新アーキテクチャの開発の成功が、そのあとの同社の快進撃のきっかけになったと考えられることである。同社は、新アーキテクチャへの転換で得た「PC ベースの（汎用）技術」を用いることで SW からシステムまで開発の拡張性、統合性を手に入れることが可能になり、エッジやクラウドとも連携させた工場管理サービス（例えば、予兆保全）など新たなビジネス展開を開始した。さらに、米ロボットメーカーを買収し、工場システムのデバイスとしてロボットを追加した。

では、この新アーキテクチャとはどのようなもので、どのような点でレガシーとは異なっていたのか。そして、オムロン社はどのようにレガシーからの転換に関する課題をクリアしていったのだろうか。本稿では、この事例を詳細に記述する。これを明らかにすることでなされるであろう貢献は、理論面よりもむしろ実践面で大きいだろう。理論的にはすでに多くの議論がなされており、本稿では、レガシーからの転換に関しいくつかの重要と思われる点を、技術システム、知識の構築、意思決定の正当化の 3 点に絞って整理し、分析の枠組みの一つと提示した。実践的な面においては、来るべき IoT 時代の技術システムをどのように構築していくか模索している企業が多く、同事例は何らかの示唆を与えることと思われる。

本稿は、次章で既存研究をレビューし、レガシーシステムからの転換の困難さ、転換の手段について整理する。3 章では、事例を記述する。事例については、当時、開発に携わっ

たオムロン社技術者（匿名。2015年2回、2017年2回）へのインタビュー、同社セミナーへの参加、文献調査（同社から提供された資料、同社HP上で公表されている情報、2次文献）によりエビデンスを収集した。第3章では、既存研究を踏まえ、オムロン社におけるレガシーからの転換のプロセスについて考察する。

2. 既存研究：レガシーからの転換

本章では、レガシーシステムからの転換の困難さとその理由、および、困難を乗り越え転換するための方法に関連して既存研究をレビューする。本稿で取り扱う事例は企業レベルであるため、企業レベルでのレガシーシステムからの転換において、重要なポイントを整理する。主に、着目するのは、技術システムに内在する課題（システム性）、組織の知識蓄積に関する課題、そして、組織の意思決定の正当化に関するものである。

2.1 技術的課題

まず、技術システムに内在する課題であるが、Huges（1983）は電力システムを取り上げ、システムズ・アプローチから技術システムの発展プロセス（発明、開発、技術革新、技術移転、成長、競争、統合）を議論した。システムを構成する要素間で、技術進歩にずれがある場合に、その発展が遅れることをしている。彼はこの遅れた技術要素を「逆突出部」（reverse salient）と呼んだ。逆突出部が重要な課題（critical problem）として認識され解決の取り組みがなされる。これらがクリアされシステムが成熟していくと技術的運動量（momentum）が高まり発展は技術軌道（technology trajectory）に沿って自律的になる。

同じようにシステム性に着目してイノベーションのプロセスを議論したのが、Rosenberg（1976）である。Rosenbergは、相互に関係する技術間の不均衡の存在が、技術開発を導くとした。なぜなら、不均衡がある方向に向けて集中的に技術革新努力を導く「焦点化装置（Focusing Device）」として働くからである。技術システム内部のロジックに目を向けた議論である。

この技術システムに関連した議論として、処方箋を示しているのが Shapiro & Varian（1998）である。Shapiro & Varianでは、ネットワーク外部性が働くシステムにおいて、世代交代が起こる際に用いられる手段として「マイグレーションパス」がある。いわゆる

「互換性」を確保することである。互換性を暫定的にでも確保し、新しい製品にスムーズに移行できる道筋（パス）を用意すれば、消費者は安心して移行できる。これにより、新しい製品への乗り換えコスト（スイッチングコスト）を下げ、新製品を試すことを可能になる。

Shapiro & Varian は、マイグレーションパスの設計には技術的な課題と法的な課題があると述べている。技術的な課題として、①互換性と性能のトレードオフを穏やかにする独創的な設計、②システムとしての価値の強調、③コンバータとブリッジテクノロジーを検討する、が指摘されている。①は性能を犠牲にすることなく、互換性を確保するよう設計することが望ましい。②については、新旧のコンポーネントを同じシステムの中で稼働できるように設計することを指す。③は、新システムが稼働しても暫定的に旧システムも維持できる仕組みである。これら 3 つの共通課題は、旧システム（のネットワーク）と新システム（のネットワーク）をつなぐためのインターフェースが作れるかである。一方、法的課題は、新旧システムの互換性を確保する際に知的財産権が他社にある場合である。知的財産権の占有者が一方的に妨害してくる可能性も否定できない。

以上のことから、レガシーシステムからの転換においてみておくべき技術的なポイントは、①移行において何が課題で、それに十分な配慮がなされているか、②マイグレーションパスが準備されているか、ということであろう。

2.2 知識蓄積に関する課題

レガシーシステムからの転換の難しさに関連する議論は、また、企業の中に蓄積される知的資源、そのプロセスである学習、プロセスに影響を与える経路依存性などのリソースベースドビュー（RBV）の中に見出せる。企業の製品技術体系は長時間をかけて知的資源として蓄積されていく。技術体系の中で用いられる言葉、概念、ロジックも学習と応用を通して獲得されていく。これらはコア・ケイパビリティとなり、企業に競争力をもたらす。その一方で、その成功体験が大きいほど、過去のやり方を踏襲するようになり（経路依存性（David,1985））、そうなるとなかなか方向性を変えることができない。外部の環境変化に対応したイノベーションを行う際に内部的な阻害要因ともなりうるのである（コア・リジディティ（Lenard-Barton、1992））。

従来の知識蓄積が新たなイノベーションへの取り組みを遅らせると指摘する研究も多い。Tushman & Anderson（1986）では、イノベーションで必要とされる知識には能力温存型

と能力破壊型の 2 種類があるため、よく見極める必要があると指摘している。能力温存型とは、従来から蓄積された知識が活用できるタイプのイノベーションであり、能力破壊型は活用できない、あるいは、役に立たないタイプのイノベーションである。レガシーからの転換で問題になるのは、新システムが能力破壊型である場合であろう。

以上のことは、企業自身がレガシーを転換する際に阻害要因になりうるという議論であるが、Christensen (1997) の破壊的イノベーションは、顧客の価値認識が阻害要因になることを示唆している。Christensen は、顧客との関係性の中で低パフォーマンスな技術への対処が遅れ既存企業が失敗していくことを描いた。既存企業が出遅れてしまうのは、既存製品のユーザである主要顧客が新製品に対して価値を認めないからである。すなわち、新製品の価値は顧客が決めることを示唆している。従い、新製品の使い方やそのメリットなど、顧客の啓蒙が重要となる。加えて、Christensen の議論は、組織的対応として、新システムの開発組織をスピノフすることも示しており、大変興味深い。

これらの議論からレガシーシステムからの転換においてみておくべき知識蓄積におけるポイントは、内部的な阻害要因がある場合、どのようにクリアするか、特に、新システム開発に必要な能力はどのように確保するか、であろう。だろう。

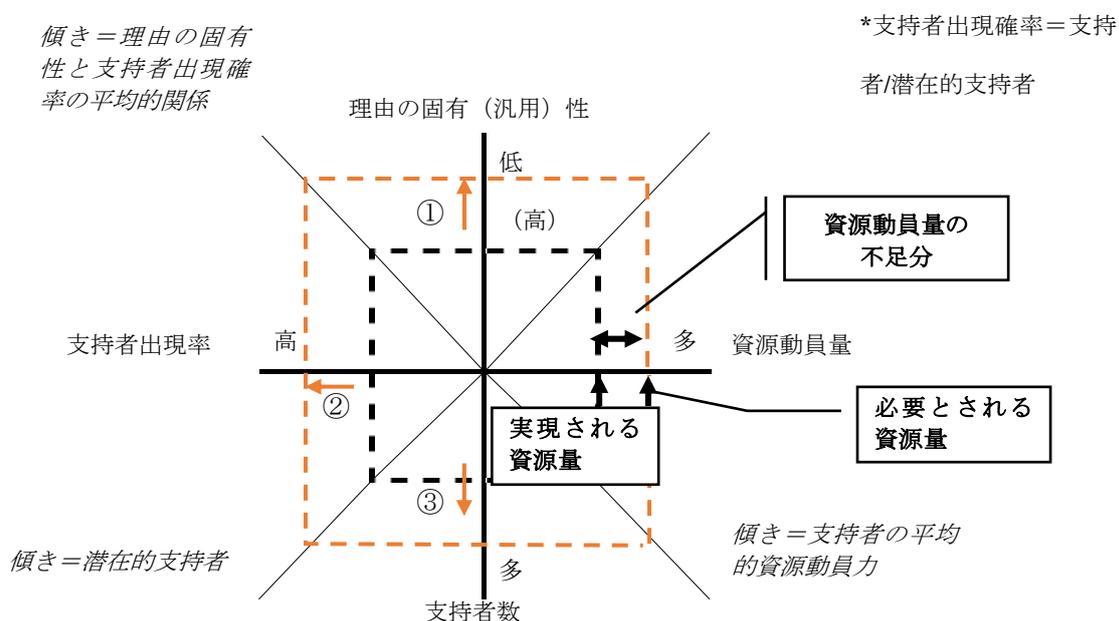
2.3 イノベーションへの資源動員の正当化プロセス

レガシーシステムからの転換が主要製品においてなされる場合、転換への投資や人的投入が巨大になることが多い。そのため、当該イノベーションへの投資や推進を正当化することが重要となる。軽部・青島・武石 (2012) は、これを資源動員の正当化メカニズムとして扱った。

彼らは資源動員の正当化メカニズムを「イノベーションの推進に対する（固有の）理由」と「期待される資源動員量」、それを阻む「資源動員の壁」から次のように規定している。まず、イノベーションが経済的成果を生むためには、当該イノベーションに対する客観的な経済合理性、つまり汎用性の高い理由が存在しなければならない。どの程度汎用性が高いかによって「製品を購入する」という幅広い支持が確保される。しかし、事業化においては、必ずしも客観的な成功の見通しが立っているわけではなく、多様な相手に向けて多様な理由によって支持を獲得して、初めて事業化への資源動員が認められる。この不確実性の高い中で如何に資源動員を正当化していくかがポイントであり、それゆえ創造的正当化と呼ばれる。多くの資源動員量が必要なのに理由が固有のままであると、期待される資

源動員量を確保できない。これが資源動員の壁である。この壁をクリアして資源を確保するルートとして、①理由そのものの汎用性を向上させることによって支持者を増大する、理由の固有性は所与として②潜在的 supporter や支持者出現率を増大させる（特定の支持者層に訴える）③支持者あたりの資源動員力を増強する（技術者層ではなく経営者層に働きかける等）、の3つが指摘されている（図1の丸数字に対応）。

図1 資源動員の壁を形成する要因と関係の構図

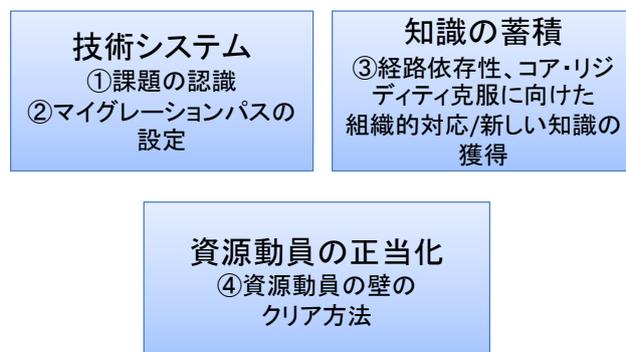


出典：軽部・青島・武石（2012）p130

2.4 まとめ

これらの既存研究からレガシーからの転換において着目すべきポイントは、以下の通りである。技術システムにおいては、①課題の認識（レガシーからの転換において、何が逆突出部となる要素で、そこが焦点化装置として働いているかどうか）、②マイグレーションパスの設定、知識蓄積の面では、知識蓄積においては、③経路依存性、コア・リジディティの克服のための措置（組織的対応）、特に、新システム開発に必要な能力の確保、④資源動員の正当化のプロセスである（図2）。本研究では、以上4点について考察を行っていく。

図2 分析のポイント



3. 事例

3.1 オムロン社のビジネス

オムロン社は1933年、立石一真氏によって創業された企業である。レントゲン写真撮影用タイマの製造から始まった。その後、数々の「世界初」製品を世に送り出した。1960年の無接点近接スイッチに始まり、電子式自動感应式信号機(1964年)、無人駅システム(1967年)、オンライン現金自動支払機(1971年)、超高速ファジィコントローラ(1987年)などである。同社の歴史は日本の「自動化」の歴史と重なる。戦後、生産性の向上を目指す日本製造業のモノづくり現場に対しては、自動化、自動化のためのセンシング技術など、FAの技術進歩を支えてきた。一方、健康管理と病気診断のための基礎的測定の研究にも早い時期から取り組み、電子血圧計(1978年)、電子体温計「けんおんくん」(1983年)を生み出した。その後、2009年には環境分野にも進出している。

組織的には、同社は1999年に事業部制を廃止しカンパニー制へと移行した。現在、制御機器事業(IAB: Industrial Automation Business)、電子部品事業(EMC)、車載事業(AEC)、社会システム事業(SSB)、ヘルスケア事業(HCB)の4つのカンパニーと、本社直轄事業(バックライト事業、パワコン事業など)からなる。

例にもれず、同社もリーマンショックの影響を受け、2008年度、2009年度の実績は落ち込んだが、リバイバルステージ(2009年2月～2011年3月)で、大幅な固定費・変動費の削減や大規模な構造改革を推進した。また、2011年には、現・山田社長が就任、長期ビジョン「Value Generation 2020」(VG2020)が打ち出された。「感じる、考える、制御す

る人と地球の明日のために」というビジョンと、定性的ゴールとして「質量兼備の地球価値創業企業」、定量的ゴールとして「売上高 1 兆円以上、営業利益率 15%」が掲げられた。作田前社長のもとでの「GD2010」では、ものづくり産業の成熟化が先進国で進むとみて、主力の IAB に次ぐ事業が探索されたが、山田社長の「VG2020」では本業に回帰しつつ、他の事業分野と融合である IA 事業 (IAB+EMC) を強化、その一方で、カンパニー制の弊害を超えるマネジメントを展開する。「カンパニー制のもとでは、それぞれの事業から得られるリターンを戦略投資に必要な資金を振り向ける。そのため、短期のコミットメントが達成できない状況の下では新商品開発や成長へ向けての取組みが消極的になってしまう。そこで、VG2020 では、本社部門がカンパニーとの間で事業環境認識を共有し、全体最適を確認したうえで、あえて高い目標を掲げ、バランスがとれた形でカンパニーにおける自律運営をさらに推進していく」(山田社長)³ ことになった。

オムロン社の業績は、2013 年度にはリーマンショック前の 2007 年度水準を超えるまでに回復した (図 3)。2015 年度、売上高 8,336 億円、営業利益 623 億円、当期利益 473 億円を記録、営業利益率は 7.5% である。中国経済の減速や原油安などの影響を受け、7 期ぶりに減収減益にはなったが、2011 年～2015 年の 5 年間で、売上高は 619,461 億円から約 35% 増、営業利益は 354 億円から同様に 35% 増と大きく伸びた。特に、車載事業、ヘルスケア事業は、それぞれ 65% 増、73% 増と高い伸びを占めている (2015 年時点で両部門の売上高に占める割合は、それぞれ 17%、13%) (表 1、図 4)。

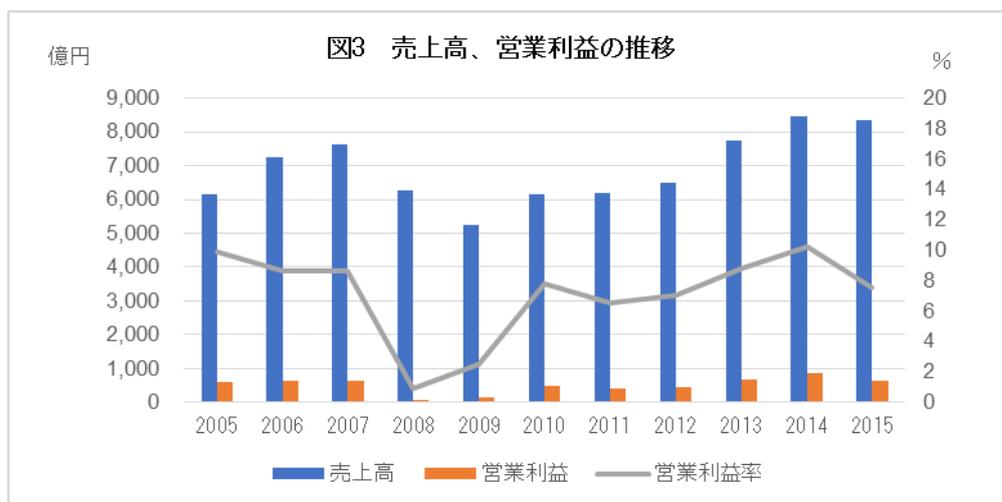
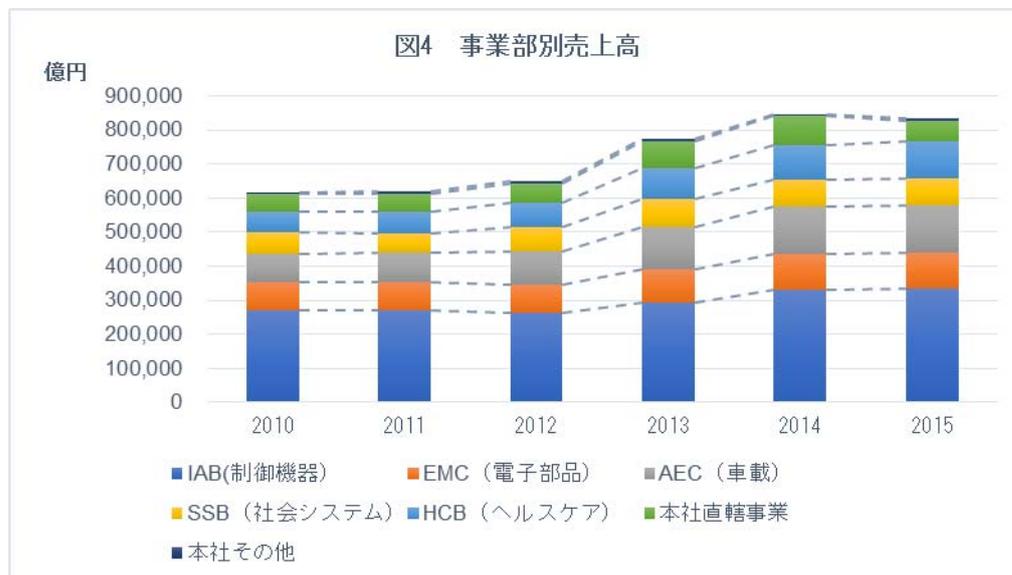


表1 2011年度～2015年度間の売上高伸び率 (単位%)

総売上	34.6
IAB(制御機器)	24.0
EMC (電子部品)	24.9
AEC (車載)	64.6
SSB (社会システム)	35.6
HCB (ヘルスケア)	73.1
本社直轄事業	17.7



出典：オムロン社 2016 年度総合レポートおよび 2011 年度アニュアルレポートより著者作成

3.2 オムロン社の FA 事業 (IAB)

本稿が取り上げる制御部門 (IAB) は全体売上の 4 割を占めるオムロン社の主力事業である。同社のコントローラ (PLC) はリレー制御盤を置き換える形で 1970 年代に誕生した。当時、製造業では、大量生産から多品種少量生産に向かっており、プログラムの書き換えができ、処理速度が速いコントローラのニーズが大きくなっていた。これにいち早く気づいたオムロン社では、1968 年に工作機械用シーケンス・プログラマを開発、1972 年にはプログラマブル・シーケンス・コントローラ SYSMAC を他社に先駆けて開発した⁴。1970 年代半ばには制御用途が、1980 年代には機能が拡大し、1990 年代に入るところには、コントローラは FA システムの中核的デバイスとなる。

オムロン社の FA 事業の大きな特徴は 2 つあると考えられる。一つ目は、FA 用コントローラ、センサ、スイッチ、リレー、最近ではロボット (2015 年に米ロボットメーカーであるアデプト・テクノロジー社を買収) まで幅広い製品を提供していることである。これらの製品をすべて合わせると、FA 業界では日本トップシェア⁵を誇るという。コントローラ (従来の PLC) では三菱電機 (リーダー企業)、オムロン、横河電機が日本の 3 強である (オムロンの国内シェアは 2 位)。海外市場では、シーメンス、ロックウェル、三菱に続き、シュナイダーとともにシェア 4 位争いをしている。

オムロン社の2つ目の特徴は、オープン志向である。FAの末端のデバイスをつなぐフィールドネットワークは当初、自社専用のものを使っていたが、それから業界標準規格に切り替えた。1990年代にはデバイスネット、2000年代に入ると顧客業界での採用が進んだEtherNet/IP（コントローラ間のネットワーク）、EtherCAT（フィールドネットワーク）を取り入れるようになる。さらに、2010年代ではセンサアクチュエータのネットワークとしてIO-Linkを採用するなど、常に同社製品（システム）にとって最適な国際業界標準ネットワークを取り入れている。

IABの売上高は2015年度時点で3360億円、2011年～2015年間の伸び率は24%である。売上高海外比率は2000年代の後半は50%程度であったが、2015年度時点では6割と拡大している。売上高営業利益率は10%を超えるまでになっており、製造業全般のそれが4%であることを考えると非常に高い数字である。（図5）。

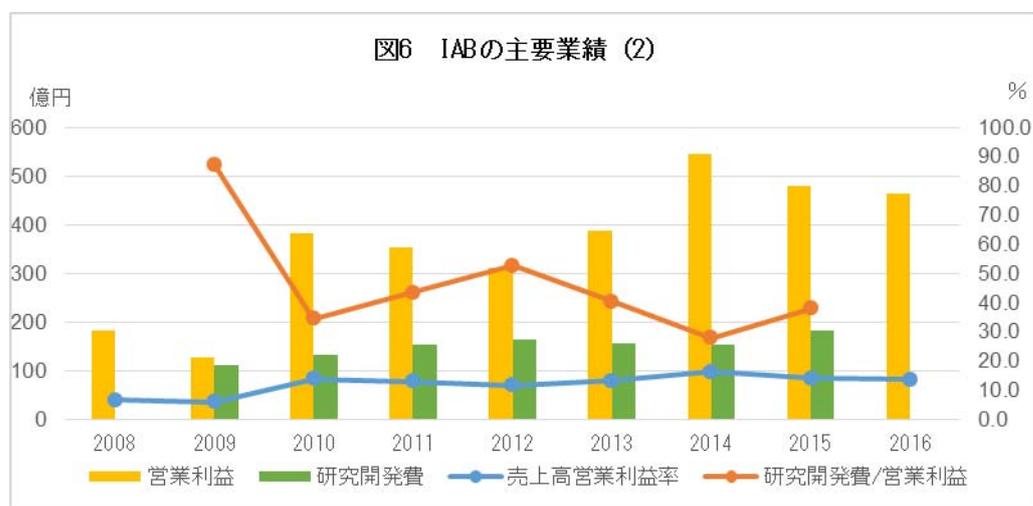


出典：オムロン社2016年度総合レポートおよび2011年度アニュアルレポートより著者作成

また、図6にあるように、IAB部門の研究開発費は2010年以降、100億円～200億円のレベルで推移している。特に2009年度は売上高2039億円、営業利益127億円であるのに対し、研究開発費は111億円であった。リーマンショックから立ち直っていない段階での大規模なものであったことがわかる。この研究開発を引き上げたのが、本稿で取り上げる新アーキテクチャの開発である。そして、山田社長が就任した2011年、新アーキテクチャに基づくコントローラが満を持して市場投入される。

2015年、VG2020のもとでIABでは、オートメーションコンセプトi-Automation（製

造業のモノづくり現場を革新) をスタートさせた。「制御進化 integrated」、「知能化 intellectual」、「人と機械の新しい協調 interactive」の3つの「i」によって価値創出を目指していくことが示された。同社が提供する各種末端のデバイスをネットワークでつなぎ IoT 化していくことを対外に大きく示したのである。主力製品であるコントローラのアーキテクチャの転換が、マシン (HW) 中心のシステムから SW 中心のシステムに大きく舵を切っていく礎を作ったといっても過言ではないのではないだろう。製品ぞろえが豊富な同社だからこそできる、そして IoT 時代に向けて超えるべき課題であり、それへの挑戦を宣言したといえよう。



出典：オムロン社 2016 年度総合レポートおよび 2011 年度アニュアルレポートより著者作成

3.3 既存アーキテクチャの限界

このようにオムロン社に IoT に大きく舵をとるきっかけを作ったのが、2008 年より開発に取り組み 2011 年 7 月に市場投入された Sysmac NJ シリーズである。以下に示すように、Sysmac NJ シリーズの開発は、HW (既存アーキテクチャ) から SW (新アーキテクチャ) への転換である。アーキテクチャは、その上に構築される「資産」の基本設計を示すものであり、Sysmac NJ シリーズの開発は、コントローラの資産を従来の HW ではなく、SW として新たに構築していくことを示していた。従来、コントローラを実装する HW には 3 つのタイプがある。パッケージタイプ、ビルディングブロックタイプ (モジュールを組み合わせるタイプ)、そして IPC (産業用コンピュータ) である。特に PLC という場合、ビルディングブロックタイプを指すことが多い。NJ シリーズは、これら HW のタイプに関わ

らず、一つの SW としてコントローラ機能を統一することを意味していた。

同社が新アーキテクチャの開発に踏み切った理由は、1 つに、ASIC という HW による制御に限界が見え始めていたことである。性能面では、半導体の微細化に沿って進化を続けてきたコントローラだが、2010 年以降、クロックタイムや実行時間など機能の進化が伸び悩むことが予想されていた。これは、ASIC ベースのコントローラ構造に由来するものである。従来、コントローラでは、機能向上に対する顧客のニーズに従って多く処理を ASIC で行ってきたが、構造的にそれ以上の要求を ASIC に盛り込むことが困難になってきたのであった。例えば、複雑なモーションコントロールはコントローラとサーボモータの密接な連携よって行われるが、サーボモータ側はモーションエンジンが載った専用のユニットが制御し、コントローラ側はラダー言語というメカニカルな言語で基本命令が（振る舞い方を示す「回路情報」として）書かれた ASIC が制御している。高速化するためには、サーボモータとコントローラ間の同期を可能な限り低遅延で実行しなければならないが、それが限界に来ていた（表 2）。

一方、ASIC 開発とその後のファームウェア開発の開発時間は徐々に長期化しており、新アーキテクチャの開発の始まった 2008 年当時には 2 年程度の期間が必要であった。さらに、ASIC に一度処理を書きこまれた回路設計は容易には変更できず、顧客からの機能向上の要望に対して、迅速に応えることは困難であった。このような ASIC の開発費用は膨大な額に上っていた（数億円規模）。

このように、ASIC という HW のアーキテクチャ資産をそのまま継承することが、将来の技術・事業発展にとって望ましいものかどうか大きな課題となっていた。何より、現状で顧客のニーズに応えられるか、疑問視されていた。オムロン社は、そこで英断を下す。アーキテクチャを一新し、SW アーキテクチャに転換することであった。

表 2 既存アーキテクチャの性能における限界

	1998	~	2008	2010	201?
Tech.	0.8u	0.35u	0.18u	0.09u	0.065u
Clock	25M	50M	100M	200M	250M?
LD exe.	40ns	20ns	10ns	4-5ns	3-4ns?

出典：同社提供資料（2011年 Sysmac セミナー向け資料）より

3.4 新アーキテクチャの開発

新アーキテクチャにおいては、従来の HW（サーボモータ）と HW（コントローラ）のアーキテクチャ（HW 中心）を SW（汎用プロセッサ上）と SW（CPU ユニットに統合）として同じチップの上で動かせるアーキテクチャ（SW 中心）に転換した。その背景には、汎用半導体（CPU）の急激な性能向上があった。1999 年あたりまでは、ASIC のほうが構造シンプルでその分処理が早かったが、それ以降は汎用半導体（CPU）の性能が急速に伸びていた。加えて、汎用半導体の消費電力が大きく改善されていた。コントローラにおいては、従来、ファンを必要としない自然冷却が基本であった。なぜなら、ファンは短寿命品であり、10 年～15 年使い続けるコントローラにはふさわしくないからである。このニーズに応えられる性能が汎用半導体で実現できる見込みが立っていた。

SW アーキテクチャに転換することで、処理スピードが向上、従い製品の性能も格段に上がった。新アーキテクチャの NJ シリーズが市場投入された 2011 年当時、ASIC を使っていた同レベルの他社コントローラの命令実行スピードが 4ns であったのに対し、オムロン製では 1.9ns であった（少ないほどよい）。さらに、革新目覚ましい汎用 CPU における最新技術を容易に取り入れることが可能になった。もっとも望ましい変化は、顧客の機能向上要望に迅速にこたえられるようになったことである。ASIC の場合、要望に応えようとしても変更には多くの時間とコストが必要だった。

一方、SW アーキテクチャへの転換には、乗り越えなければならない課題が山積していた。①コンパイラ方式化によるコントローラ機能実現課題、②汎用プロセッサの発熱対策・長期供給体制、③負荷変動の中で一定時間保証された制御動作、並列実行（ASIC）の逐次実

行化などである。①の例として、オンラインエディットがある。これはコントローラのデバック機能であり、稼働しながら顧客のプログラムを書き換える機能のことである。従来の HW アーキテクチャはインタプリタ型で、ユーザプログラムを ASIC がそのまま実行していた。一方、SW アーキテクチャはコンパイラ型である。ユーザプログラムをコンパイルして汎用プロセッサで実行できる言語に翻訳する。このユーザプログラムのコンパイラ作業に時間がかかると、制御実行に遅延が生じてしまう。これは重大な課題であった。②については、上述のように発熱の問題を解決する必要があった。③については、ASIC では並列回路であり、いろんな機能を並列して処理することができた。一方、汎用 CPU では逐次実行にする必要があった。

CPU 周辺の課題については、インテルからの協力を得てクリアされた。インテルの Atom を使いたいというオムロン社に対し、インテルは熱心に応えた。当時、PC 向けプロセッサの需要が頭打ちになりかけており、インテルは車載（ナビ、室内制御等）や産業用への事業拡大を模索していたのである。オムロン側はインテルに対し FA 業界のナレッジを提供したほか、ユーザー・レビューアとして要望や指摘を行った。これは、インテルにとっては、将来の CPU の方向性を決めていく際の判断材料となった。一方、インテル側は、オムロン社に対し新製品のサンプルや情報を早期に提供し、かつ、採用した Atom に対しては 7 年間という長期供給保証も与えた。これにより、上述の通り、前倒して次世代 CPU を採用した新製品開発が可能になった。

さらに、この Sysmac 開発においては、Windows 上で動く統合 SW (Sysmac Studio) も開発された。これまで別々だった開発ツールを、1 つの統合開発環境 SW として提供したのである。ネットワーク、シーケンス制御、モーション制御、サーボ/インバータなどにおいて、コンフィグレーション（構成設定）、プログラミング、モニタリング機能の他、3D モーションシミュレーションにも対応させている。2017 年現在では、さらにアプリケーションの種類を増やしつつ、1 つの SW で全部のデバイスを設計・開発・制御・管理等できるように SW を統合プラットフォーム化している。

SW においては、Look & Feel（見かけと操作感）が重要な要素である。国際標準 IEC のツールと同じ Look&Feel であれば違和感なく、マニュアルがなくてもプログラミングが可能になる。さらに、これらは、IEC 規格、PLCopen 規格に準拠しているモーション制御（ファンクションブロック）を採用したプログラミング環境を提供している。ファンクションブロックには、デバイス相互の機能・性能をすり合わせて価値を生み出すような制御プロ

グラムが込められている。オムロン社では、ILO+S（最近は、Robot を加え、ILOR+S）⁶と称して、摺合せ技術・商品の価値を高めているが、そのきっかけが、まさにこれである。

また、この SW の開発においては、マイクロソフトから次期 Windows への対応、チーム開発環境、構成管理サーバなどにおいて、協力を得た。

このように、新アーキテクチャでは、顧客の生産性の向上を第一に考えていること、さらにそれを実現するために国際標準規格と広く普及した Windows を活用していることは、特筆すべき点である。さらに、これは特に国際市場へ打って出る際に非常に有効に働く。海外での代理店や SE、ユーザ企業のオペレータにとっても、格別に扱いやすくなるためである。コントローラの開発技術者を海外で確保する際にも、大きなメリットとなる。

3.5 開発を巡って

技術開発は 2008 年度下期からスタートした。開発体制は、十数名程度の人員が充てられた。2009 年度からは開発センタの商品開発テーマとなり、人員は 3 倍程度に拡大した。そして、2010 年度には IAB 開発センタの商品開発体制は 10 倍程度に拡大、コントローラ、サポート SW の開発に加え、システムバスの開発も開始された。この間、開発者の能力・スキルの変化もあった。それまでの既存製品の仕様の知見に加え、SW 工学、純粋な SW 設計・プログラミングの能力が新たに必要とされ、教育・トレーニングが実施された。

この一連の開発には、数十億円もの開発費が投入された。このうち、65%がファームウェア、27%がツールソフト（コントローラのプログラミングのための PC ソフト）などの SW 開発に充てられ、HW 開発はわずか 8%程度だった。

新アーキテクチャ開発を担った技術者によると「今（当時）のコントローラのアーキテクチャには限界がある。このままでは、競合に負けることはなくても、競合に勝つことはできない。勝つにはアーキテクチャを変えるべきだ。「勝つ」ことをやろう」という判断があったという。しかし、巨額の開発プロジェクトであるもののその効果に対しては懐疑的な見方も社内にはあった。さらに、計画の遅延も生じた。上述の新アーキテクチャの課題は、最初からすべて見えていたものではなく、やりながら見えてきたものも多かった。やればやるほど作業が増えた。定期的におかしな現象がみられるが、どうてもバグが取れない。その原因がわからない。どこまでやったらいいか、見通すことができなかったのである。

商品発売後は、商品の機能・性能は優れたものだとの社内的には認知はされたが、売上が立ち上がるのに時間がかかった。顧客側のスイッチングコストは大きく、導入が遅れたことが影響したのである。従来のアーキテクチャをもつコントローラとは、EtherCAT など国際標準規格のネットワークでシステムとしてつなぐことが可能だった。しかし、従来の開発ツールに慣れている既存顧客の中には切り替えに躊躇するものもあった。

しかし、この間、変化がまったくなかったわけではない。まず、同社のシステムエンジニア（SE）たちが顧客の問題解決に迅速に応えられることを喜んだ。そして、顧客の課題解決を他社コントローラでは出来ないレベルの制御技術（たとえば「制振制御」）を使って実行した SE が顧客から絶賛されるようになる。こうして新製品の価値が少しずつ顧客の間で評価されるようになっていった。2012、13 年ごろには大手顧客がオムロン社のオートメーションのコア技術だとして採用するようになった。これら顧客の変化を通じて、社内でもその商品価値が改めて認知されるようになっていったのである。

さらに、新アーキテクチャをベースにした普及型（小型のパッケージタイプ。これまで別々のモジュールだった演算、I/O も同じボックスに入る）コントローラ（NX1P）が 2016 年に発売されると、売上げが加速した。新アーキテクチャのラインアップは、上位機種 of NX701、中位機種 of NJ501、301、低価格の下位機種 NJ101、NX1P がそろった（NJ は、アーキテクチャは新しいが従来の I/O を持つ機種。NX は I/O も新しい機種）。これらの間では、SW 資産が共有できる。つまり上位機種でも下位機種でも同じ SW 資産を使い、価格やニーズに応じて使える機能を選択する形である。ここに新アーキテクチャならではの SW の Scalability が効果を発揮する。その影響はこれから新アーキテクチャ採用の製品群が増えれば、ますます大きくなっていく。また、他のデバイスとも PC ベースの SW で国際標準ネットワークを介して繋がる。同社の新アーキテクチャは、事業的にも上昇気流に乗ったといえよう。

3.6 継承性の問題

継承性に関しては開発当初・開発中からも絶えず議論された問題だった。特に日本のユーザは既存のラダープログラムを資産として、その資産が使える、つまり継承性の良いコントローラを求める傾向にある。これは、オムロン製、他社製コントローラのユーザに関係なく存在する。このラダー言語（プログラム）は、国際標準（IEC61131-3）の中に含まれる言語ではあるが、従来の開発環境と言語はメーカーがそれぞれ独自に作ったものであり、

国際標準となったラダー言語とは別のモノだった。このことが継承性に立ちはだかる問題の源（真因）であった。

開発当初、オムロン社ではこの問題に対して大胆な決断がなされる。自社内の技術システムの継承性よりも、国際標準化された開発環境の提供によりユーザの生産性を飛躍的に向上させることが最重要課題としてとらえられ、その方向に大きく舵を切ったのである。これにより、既存コントローラ（HW 中心のアーキテクチャ）からの切り替えのハードルは高くなったが、新規顧客、特に欧米の顧客の開拓には好条件となった。最近では、上述の小型普及型のパッケージタイプコントローラ（NX1P）は、新規中国ユーザによる採用が進んでいる。

既存のコントローラと共存させる場合、同社では予めから国際標準ネットワーク規格である Ethernet/IP や EtherCAT を採用していることが幸いしている。既存コントローラ、NJ/NX とも、これらのオープンネットワークを介して繋ぐ形態をとることができる。

4. 考察

本章では、オムロン社では新アーキテクチャに転換における課題をどのようにクリアしてきたのかについて、2章で示したように、技術システムにおいては、①課題の認識（レガシーからの転換において、何が逆突出部となる要素で、そこが焦点化装置として働いているかどうか）、②マイグレーションパスの設定、知識蓄積の面では、知識蓄積においては、③経路依存性、コア・リジディティの克服のための措置（組織的対応）、特に、新システム開発に必要な能力の確保、④資源動員の正当化のプロセス、の4点から考察を行う。

①について、オムロン社では、まさしく HW 中心のレガシーシステムから SW 中心のシステムへの転換であると認識されていた。それに対して巨額の金銭的投資と人的投資がなされた。投資額のうち SW 開発に対する投資は 65% を占め、人的投資も佳境期には当初の 10 倍以上に上っている。SW の開発が焦点化装置として機能していたことがうかがえる。

②のマイグレーションパスについては、同社で採用した国際標準というオープン規格が機能したと考えられる。同社ではかねてより国際標準規格を積極的に取り入れていた。それにより、既存アーキテクチャ製品と新アーキテクチャ製品を繋ぐことが可能であった。さらに、国際標準規格を採用することで、デバイス（コントローラ）とフィールドネットワーク規格の間で依存関係が整理しやすかったことも功を奏したのかもしれない。国際標

準規格を採用することでデバイスをモジュール化することが容易であり、デバイス側のイノベーションに注力することの可能性が広がったと考える。相対的な問題ではあるが、自社のネットワーク規格を国際標準とした大手他社の場合、他社にオープンになっていたとは言え、自社に有利な技術的仕掛けを有していることが多い。この違いが、オムロン社にデバイス（コントローラ）側のアーキテクチャイノベーションに専念できる余地を与えた可能性は否定できない。

知識の構築面での③の経路依存性、コア・リジディティについては、同社内のレガシーの転換に対する抵抗は確かにみられた。それを押して、新たな技術的知識を導入する手段として機能したと思われる点は社内外に見られる。社外的には、他社との連携（インテルやマイクロソフト、さらには買収など）による突破口である。オムロン社はインテルやマイクロソフトと密接な協業関係を築いた。それにより新アーキテクチャを構築する際のノウハウを外部から注入することに成功したと考えられる。一方、社内的には、人材育成に見られる。NJシリーズの開発プロセスに投資されるべき人材スキルの変化にオムロン社は対処していた。HW 中心だった従来のアーキテクチャに必要であった人材スキルに加え、SW 中心の新アーキテクチャ開発に必要とされるスキル開発にも注力していた。

製品開発に対する資源動員の正当化については、まず、理由の汎用化がなされた。同社にとってレガシーからの転換は、制御を SW として統合することがコントローラ制御の低遅延化や SW 資産の Scalability において、他社との差別化になるという、同社固有の理由があった。それに加えて、新アーキテクチャの転換が顧客にとっても大きなメリットになる。つまり、当該イノベーションの理由は、顧客にも拡大されたのである。単に企業固有の理由だけでは、これほどの大きな投資は行われなかったかもしれない。

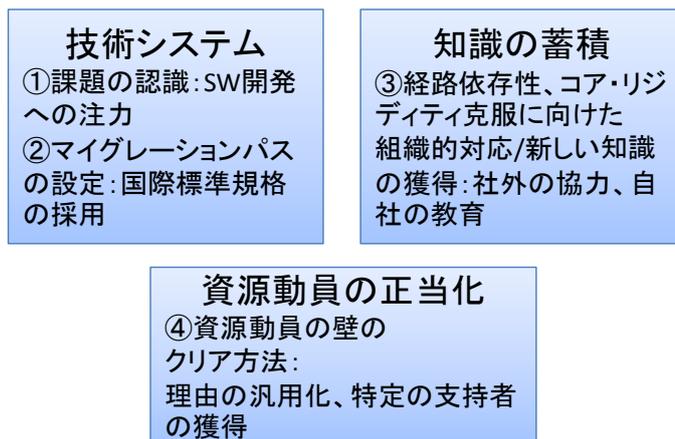
確かに、そのメリットは当初は顧客側のスイッチングコストの壁に阻まれ、理解が進まなかった。しかし、新アーキテクチャを実装した NJ シリーズに対する顧客の認識は、明らかに変わっていった。新製品による課題解決の様子をみて、顧客自身が既存アーキテクチャよりも新アーキテクチャのほうが生産性向上に将来的に役に立つことを認識し始めた。まず、2012、3 年ごろ、日本においては大手顧客が NJ はオムロン社のコア技術であると認識した。さらに、2016 年発売の下位機種においては新規の中国ユーザがこの価値を認めた。

オムロン社の事例において、レガシーシステムからの転換に必要な資源動員の正当化プロセスは、①理由そのものの汎用性を向上させることによって支持者を増大することから始まったが、②特定の支持者層（日本の大手既存顧客）や潜在的な支持者（新規中国ユーザ）

を獲得したことが、事後的に作用したと考えることができる。これらが、オムロン社内の当該技術に対する認識を、改めて力強くプラスに変えていったのである。

以上の考察をまとめたものが図7である。

図7 オムロン社の分析



出典：著者作成

5. まとめ

本稿では、オムロン社において開発されたコントローラ（NJ シリーズ）の事例を取り上げ、レガシーシステム（アーキテクチャ）からの転換について考察した。従来のコントローラアーキテクチャは ASIC を用いた HW 中心のアーキテクチャであったが、これを SW 中心のアーキテクチャに変えるものだった。これはレガシーシステムからの転換を意味する。オムロン社では、リーマンショックから復活しきれていない 2008 年に巨額の開発費を投じて技術開発に乗り出した。その開発プロセスは順風満帆からは程遠く、予想外の課題にぶつかり計画が遅延した。また、商品投入後も売上がたつのに時間がかかった。しかし、この状況は 2016 年度に大きく変わる。下位機種への新製品投入により、全体の売上の伸びが加速した。これをきっかけに、オムロン社では SW の Scalability がようやく効果を発揮できる状況になってきたところである。

この事例は、IoT 時代に先駆けて、SW ベースのアーキテクチャに転換したものとして注目に値する。IoT においては、デバイスからのデータが価値を持ち、高度なコンピューティ

ング技術で解析されて新たなサービス価値を生み出す。デバイス（Physical System）とそれをつなぐネットワーク、そしてコンピュータ技術（Cyber System）との連動が前提条件なのである。IoT には、HW 中心のアーキテクチャよりも SW 中心のアーキテクチャのほうが、取り組みやすい。

本稿では、オムロン社がこの転換を成し遂げられた要因として、①レガシーからの転換において、何が逆突出となる要素で、そこが焦点化装置として働いているかどうか、②マイグレーションパスの設定について、知識蓄積の面では、③経路依存性、コア・リジディティの克服のための措置（組織的対応）、④意思決定の正当化の 4 点から考察し、いずれも新アーキテクチャへの転換にプラスに作用していたと考察した。

本稿に貢献があるとすれば、理論的な貢献よりも実践的な貢献であろう。理論的にはすでに多くの議論がなされている。強いて言うなら、比較的新しい資源動員の正当化論の理論的追加ができたことだろう。実践的には、来るべき IoT 時代の技術システムをどのように構築していくか模索している企業は多く、オムロン社の事例はなんらかの示唆を与えるだろう。

では、なぜ、オムロン社ではこれが可能だったのだろうか。一つには、コントローラメーカーとしてオムロン社はチャレンジャーというポジションにあったことを挙げることができよう。これは、破壊的イノベーションと関連する。チャレンジャーとしてのオムロン社は、確かに社内における認知には時間がかかったものの、PC ベースの新アーキテクチャに前向きであった。それは、2008 年というリーマンショックから復活しきれていない時期に、巨額の開発投資を認めたことに表れている。同社では、以前よりグローバル化、オープン化に積極的であった。マイグレーションパスとして機能したネットワーク規格においても、自社規格を通すことをやめ、国際標準の EtherCAT を採用している。こうしたことを可能にしているのは、チャレンジャーというポジションにあり、攻めの経営をよしとする企業文化があるからであろう。

また、ベッコフ・オートメーション社の存在も影響があるのかもしれない。現在、オムロン社も採用し、その採用企業が増加の一途をたどっている EtherCAT はベッコフ・オートメーション社が開発したものであるが、同社では産業用パソコンにおいて SW でコントローラをコントロールするという技術にも注力してきた。このソフトコントローラは長い間、特に欧米企業で採用されてきたが、日本市場においては HW 中心のアーキテクチャが主流であり、多くのコントローラメーカーで採用を続けている。こうした環境の中でもオ

ムロン社が PC ベースの新アーキテクチャへの転換に踏み切った理由として、近くにベッコフという存在があったことが、何らかの影響を与えているのかもしれない。

加えて、システムインテグレータ (SIer) 機能をより多く内部化しているオムロン社では、外部化の傾向が強い他社とは異なり、アーキテクチャの転換の影響を自社で吸収できると考えられる。これは、協力企業との関係性がイノベーションに影響を与えることと関係がある。系列関係に見るように多くの協力企業を持つ大企業においては、協力 (下請け) 企業とともに技術資産を構築していく。大規模な技術アーキテクチャの転換は、その技術資産に大きな影響を与える。外部化しているとは言え、資本提携や技術提携・指導など密接な協力企業が多いほど、アーキテクチャの転換が困難だと言えるだろう。

本稿を終えるに当たり、そもそも継承性とは何か、ということを考えたい。継承性といっても、一体、何を継承するか。オムロン社では、HW 中心の従来アーキテクチャを継承するかどうか当該製品の開発当初より議論してきたが、そもそも、従来アーキテクチャにおいては、開発者とそれ以外の人の間で技術が共有されていなかった。特に SE が困っていた。技術者のブラックボックスに触ることができず、顧客の問題解決に応えられなかった。

この状況が意味することは、既存アーキテクチャは継承がそもそも困難であるということである。自社の中に閉じたものであるなら、後継技術者を長年にわたり鍛え上げれば済むことかもしれない。しかし、グローバル化・オープン化のメガトレンドが存在する中で、既存アーキテクチャにおける独自のラダー言語とそのプログラミングの資産は、ブラックボックス化はできても、拡張性がない。継承性ということを考えるのなら、SW 中心の新アーキテクチャであるほうが容易である。扱える人材も多く、また、拡張性が高い。

継承性という場合、顧客にとっての継承性か自社にとっての継承性かを見極めて議論する必要がある。オムロン社の場合、顧客にとっての継承性を犠牲にしたようにみえるが、そうではない。顧客にとってもこれから将来的に SW 資産を持つことが望ましいと判断したのである。一時の不便をとるか、将来にわたる不利益をとるか、HW 中心に展開してきた日本製造業の課題をオムロン社の中に見出せるのではないだろうか。レガシーからの転換は古くて新しい、IoT 時代の課題である。

注

1. 2011 年に採択された。
2. Industrie 4.0 Working Group: “Recommendation for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0” , 2013. p.5 より
3. 山田社長「新長期ビジョン「VG2020」を語る」
http://www.omron.co.jp/ir/irlib/pdfs/ar11j/ar11_11.pdf より一部文言を著者変更。
4. 同社 HP 「オムロンの歴史」参照。
<http://www.omron.co.jp/about/corporate/history/ayumi/matching.html#history1970-2>
5. 2013 年度、日本制御機器工業会調べ。
6. I は Input (センサ)、L は Logic (演算、PLC)、O は Output (出力、サーボやアクチュエータ)、S は Safety をそれぞれさしており、オムロン社では、ILO (さらにはロボット) をすべて自社で製造している。

参考文献

- 小川紘一『オープン&クローズ戦略（増補版）』, 翔泳社, 2015年.
- 妹尾堅一郎「産業生態系の大変革と次世代のビジネスモデル」日本知財学会 知財人材育成研究分科会第30回例会資料, 2017年.
- 武石彰・青島 矢一・軽部 大『イノベーションの理由』, 有斐閣, 2012年.
- Christensen, C. M., *The innovator's Dilemma: When New Technologies Cause Firms to Fail*, Harvard Business School Press, 1997
- David, P.A., "Clio & the Economics of QWERTY," *The American Economic Review*, Vol.75, No.2, 1985, pp.332-337.
- Hughes, T.P., *Networks of Power, Electrification in Western Society, 1880-1930*, The Johns Hopkins University Press, 1983. 翻訳 市場泰男訳「電力の歴史」, 平凡社 1996.
- Industrie 4.0 Working Group, "Recommendation for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0", 2013.
- Lenard-Barton, D., "A Paradox in Managing New Product Development," *Strategic Management Journal*, Vol.13, Special Issue: Strategy Process: Managing Corporate Self-Renewal, 1992, pp.111-125.
- Rosenberg, N., *Perspectives on Technology*, New York: Cambridge University Press, 1976.
- Shapiro, C. & Varian, H.R., *Information Rules: A Strategic Guide to the Network Economy*, Harvard Business School Press, 1998.
- Tushman, M. L. and Anderson, P., "Technological Discontinuities and Organizational Environments," *Administrative Science Quarterly*, Vol.31, September, 1986, pp.439-465.