

第4次産業革命とシステムの経済 ～パラダイムシフトとシステム変革への要請～

藤野 直明*

4th Industrial Revolution and Economy of System – The need for industrial system innovation in Japan from the perspective of paradigm shift –

Naoaki FUJINO*

Abstract– The 4th Industrial Revolution (I 4.0) and Digital transformation (DX) require concurrent transformation in various aspects of the industrial system and its surrounding social systems. The various aspects are business model, the architecture and coordination mechanism of the industrial system, the method of products and solution development, the competitive environment, policies of industrial and science & technology, education system of working people, and the concept of work, etc. These transformation are led by paradigm shift.

Japanese companies' approaches to I 4.0 and DX have based on functional silos in many cases, have seemed to bring too slow and too small changes, and rarely have not led to a full-scale investment.

Because, it is not easy for Japanese companies to adopt the new paradigm, which is different from the one that has supported the past success of Japanese companies. Japanese companies and governments must design system innovation to realize “Economies of systems” from a comprehensive and long-term perspective.

This paper proposes the emerging conceptual framework of I 4.0 and DX to analyze this paradigm shift.

Keywords– The 4th Industrial Revolution, Digital transformation, industrial and science and technology policies, paradigm shift, open innovation, open service innovation, the power of modularity, systems engineering, system innovation, economy of system, framework of the 4th Industrial revolution and digital transformation

1. はじめに

4年前に横幹連合で行った「第4次産業革命とシステム化研究会」（主査：木村英紀）では、当該テーマについて主査を含む12名の委員により検討を加え、大胆な仮説を含む提言を行った[1]。当該研究会報告書（以降、「研究会報告書」）は、4年後の今振り返っても内容を大きく修正する必要が無いほどの先見性があったと感じている。木村主査を筆頭に研究会報告書の提言に共感する多数の関係者の努力により一般社団法人システムイノベーションセンター（Systems Innovation Center, センター長 齋藤裕：以下「SIC」）が設立され、その活動も

2年目を迎え軌道にのりつつある。また、情報処理推進機構（IPA）には「産業のシステム化」推進の公的組織となるべくデジタルアーキテクチャ・デザインセンターが設置された。

「研究会」では、「システム化の遅れに起因する日本の弱点」や「システム化が遅れた背景」の分析も行った。

研究会以降観察された現象としては、DX (Digital Transformation) というキーワードが定着し、大企業を中心に先進技術活用の試み (POC: proof of concept) も多数実行されたが、必ずしも本格投資には結実していない。中小製造業には、オープンイノベーションへの期待から海外機関投資家が高い関心を寄せているが、契約に結び付くケースはまだ少ない。（本稿では第4次産業革命 (I 4.0) と DX とは便宜上同義とみることにする。）

これらの現象の背景には、経営の形式知化、組織知

*野村総合研究所 東京都千代田区大手町 1-9-2

*Nomura Research Institute, 1-9-2 Otemachi, Chiyoda-ku, Tokyo

Received: 1 April 2020, Accepted: 22 April 2020.

化、が十分なされておらず「システム化」が遅れているという現象がある。まさに研究会の分析通りであり研究会報告書の分析や提言がより重みを増してきたのではないか。

日本企業の「システム化」が遅れているとしたら、その要因は何か。本稿は研究会報告書を基礎としつつ、最近の話題を取り上げ、あらためてその要因を探索しつつ「システム化」推進方法の検討をねらいとした。

要因として、次の3つの点を訴求したい。

- ① I4.0 や DX は、産業システムの「構造」と「調整機構」の変革を要求する。この結果、産業や社会システムの幅広い分野、具体的には、事業モデル、競争優位性確保の考え方、対象市場、価値創造や企業戦略の考え方、業績評価の考え方、製品やソリューション開発の方法、産業政策と科学技術政策の基本的な考え方、働き方や社会人教育の考え方などについて、同時並行の変革、つまりシステムの変革が要求されているパラダイムシフトであることが十分に認知できていない、ということではないだろうか。
- ② 新しいパラダイムは、「システムの経済」を利用する。「システムの経済」とは、ユーザーを含む産業システム全体の長期、中期、短期の環境適応力（後述：ダイナミックケイパビリティ）の向上による経済性である。
典型的な事業モデルは、価格破壊かつ限界費用ゼロの経営資源である“クラウド型ソフトウェア”を活用し、スケールアウトできる“製品サービスシステム (PSS : Product service system)”であり、産業システムの構造は、PSS がオープンで柔軟に連携する、水平ネットワーク型の構造 (=エコシステム) へとシフトする。
- ③ 新しい事業モデルや産業システムの構造は、日本企業の過去の成功を支えた、いわゆる「規模の経済、範囲の経済」を追求し、(企業グループ内) 自前主義の擦り合わせ調整での製品開発、大量生産・多重下請けの垂直連鎖のピラミッド構造、品質とコストを競う“(製品の) スポット市場を中心とした製品販売事業モデル”とは大きく異なる。

パラダイムシフトへ円滑に適応していくためには、俯瞰的、かつ長期的な視野で、「産業と社会のシステム変革」をデザインすることが重要と筆者は考える。

SIC やデジタルアーキテクチャ・デザインセンター、横幹連合の今後の活動に大きく期待したい。

本稿は、「研究会報告書」を基礎とし、以降、実務に身を置く筆者から観察できる経済現象を整理、横幹連合の趣旨に沿って、できるだけ俯瞰的な視座からパラダイムシフトの諸相とシステム変革の必要性を整理し、横幹連合の今後の活動に資することを試みたものである。構

成は下記である。

- I4.0・DX における日本企業の閉塞状況
- 「システム化」からみた I4.0・DX の捉え方
- 再考：第4次産業革命
- 「システム化」が要請するパラダイムシフトの諸相
- 求められるシステム変革とその方法論の研究

2. I4.0・DX における日本企業の閉塞状況

最近もハーバードビジネススクールのマイケルポーター教授が、日本の経済や企業の課題についてコメント [2] している。

「日本の経済や企業について考えるとき、成長率の低さと生産性の低さに着目している。日本人はとても手際が良く、教育水準も高い。時間をかけて培ってきた技術力もある。それにも拘わらず成長性や生産性が低いのは驚くべきことだ。

背後にある最も大きな課題は、DX への熱意が余りないことだと私はみている。現在の企業はデジタル技術を生産や流通に使うことでデータを測定したり、分析したりすることが求められている。これができれば日本の会社も生産性が高まるはずだが、実際にはそうっていない。他の国の会社と比べて、日本の企業は CIO (最高情報責任者) の役割が重視されていない。日本では CIO 自身も役割の大きさに気づいていないし、そもそも何をすればよいか、あまり分かっていない。」

ポーター教授のこの指摘に対し「日本企業の課題は、かなりの程度マクロ経済環境と政策で説明できるので、企業経営者の努力で解決できる問題ではない。このためポーター教授の指摘は適当ではない。」と反応される経営層の方も多い。しかしながら、世界を知る教授の優れた感性と率直な意見は無視できない。また、内部留保で多額の現預金を抱えつつ DX への本格投資には躊躇している企業が多い事実には異論はないだろう。

下記、統計的なエビデンスには乏しいが、筆者の周辺で複数観察される最近の現象を御紹介したい。

2.1 大企業の DX への取組と課題

2.1.1 多数の POC と少ない本格投資

ソサエティ 5.0 や DX が大きく取り上げられ、日本企業においても、要素技術として、IOT, Big Data, AI などの先進技術活用の試み (POC) が多数実行され、新聞やビジネス誌などのマスメディアに掲載されている。しかし、日本企業では多数の POC が、個々には成功と評価されつつも必ずしも会社全体の本格的な投資には繋がってはいない。あらためて経営全体にとっての DX の目的が問われてはじめてきている。

これは、POCがボトムアップの部分組織視点から設計される傾向がありDX投資が経営全体へ与える効果が明確ではないこと。さらに、その理由は、経営全体の業務オペレーションをシステムと捉え、「システム構造」や業務オペレーション、つまり「システム調整機構」の分析や設計がなされていないこと。企業全体の視点から業務オペレーションに責任をもつ組織が設置されていないこと、が要因と考えられる。当該領域の担当組織は海外先進企業では存在していることが普通である。

2.1.2 スケールアウトするための技術移転力の乏しさ

日本企業が直面している課題として以前より指摘されている「海外展開、M&A・PMIの際の技術移転力が弱い」という課題はまだ解消されていない。製造技術や製造管理技術の形式知化、組織知化による技術移転力の高度化は、海外ではI4.0やDXの大きなねらいの1つなのであるが、日本では関連するテーマとして取り上げられることはむしろ少なく、要素技術の活用に焦点が当てられているケースが多い。

2.1.3 ダイナミックケイパビリティの重要性

さらに昨近、米中対立や世界的な感染症拡大を含め、地政学的なリスクへの対応が大きな課題となってきている。このため企業経営においては、各種製造技術、製造管理運営技術を形式知化、組織知化、ソフトウェアでクラウドサービス化し、環境変化に対し機敏に適應できる「ダイナミックケイパビリティ」が重要となってきている。

この点も2.1.2と同様、I4.0やDXの大きなねらいの1つなのであるが、日本では関連するテーマとして取り上げられることは少ない。

2.2 中小製造業のDXへの取組と課題

2.2.1 海外機関投資家の関心の高まりと幻滅

海外機関投資家は日本の中小製造業に強い関心を持ち始めているが、本格的な投資に至っているケースは少ない。下記は、東南アジアの投資銀行と日本の地方銀行との典型的なケースである。

「日本の中小製造業へ出資し、東南アジアの製造業と提携させて事業拡大させたい。紹介して欲しい。」と複数の地銀に相談した。日本の製造業は製品の加工精度、製造技術、品質管理能力は極めて素晴らしいから、だそうである。地銀は地元の中小製造業10社を1週間のツアーで紹介した。（地銀は数100億円以上の取引の可能性を期待していた。）

しかし、ツアー最終日にこの投資銀行が告げた言葉は地銀のバンカーの想像を超えていた。「大変申し上げにくいのですが、残念ながら1社も投資適格要件を満た

しません。理由は製造管理技術、経営管理技術が属人的で形式知化、組織知化、システム化されていないことです。スケジューリングはホワイトボードでの会議体、品質管理はシニアの管理者の経験と勘、見積原価はエクセルシートという状態。WTOで推薦されている標準原価計算も原価差異分析もなされていない。安価なERPすら活用していない。なぜでしょうか。正直、理解に苦しみます。これでは提携させても技術移転ができません。もっと普通の会社を紹介してください」

東南アジアの一部中小企業のIT化のレベルよりも日本の地方中小製造業のIT装備率が低い、もしくはそこに価値観や熱意がないことの証左である。

2.2.2 技術継承など技術移転力の脆弱性

中小製造業が直面している課題は、「人手不足、技術継承、事業承継、海外展開の際の技術移転力の脆弱性の解消」である。筆者が問題だと思うのは、これらの経営システムの問題と、I4.0やDXとが関連付けて議論されていないことである。問題となっている人手不足は、単にロボットを導入すれば解決するという問題ではないのである。

2.3 閉塞の要因は「システム化」の遅れか

2.3.1 ユーザー企業とITベンダーが直面する悩み

クラウドサービスがさらに進展し、低価格での業務アプリケーションやAI、コンピュータリソースの活用が可能となった。しかしながら、海外と比較し日本での普及速度は著しく遅いと筆者は感じている。

経営層からは「何にどう活用してよいかわからない」という「正直な意見」がよく寄せられる。同時に「何に活用するのか要件を決めてくれなくては提案のしようがない」というITベンダーも多い。

2.3.2 海外ベンダーの率直な疑問

このため「JIREI」という謎の英語まで登場した。海外ベンダーからは「日本企業向けには、そのまますぐ真似できる競合他社のJIREIが有効だと聞いたが本当か。米国では他社はまだやっていない新しいアイデアを一緒に創造できるかと尋ねられるのだが」と訝しがられるのも、滑稽ですらあるが現実である。

2.3.3 日本企業特有の「システム化」軽視の姿勢

研究会報告書でも指摘されているが、ITの技術そのもの、また実装方法については価値が置かれている。しかし、どういう領域でどう活用するのかという要求仕様の設計、要求定義については、ベンダーはクライアント企業の経営の問題とし、ユーザーはITを活用する現場

が仕様を決定するべきとの考え方が採用されるケースが多い。

しかしながら、現場は優秀でも構造上「部分」であり、経営「全体」ではない。部分最適の総和は全体最適に繋がるとは限らない。このため、経営全体をシステムとして捉え高度化していく「機能横断型のオペレーション管理組織」が必須となる。

さらに、計画情報の共有やリスクシェアリングなどの企業間、組織間の調整機構など、産業全体のシステム調整機構の設計も必要である。日本ではあまり知られていないが、東南アジアを含む海外では流通業を中心とした ECR (Efficient consumer response) 組織、さらに GS1 (Global Standard One) などの国際的な標準化機関が企業間調整機構の設計を行っている。このことも指摘しておきたい。

2.4 日本企業特有の閉塞状況の存在

I4.0 や DX への適応の遅れを、近年の日本経済のマクロパフォーマンスの問題と結びつける議論は本稿の範囲を超える。しかしながら、多数の企業と接する機会が比較的多い環境にいる筆者には、一部の例外はあるにしても、「日本企業の I4.0 や DX に対する取組が本格的な効果を生んでいるケースはまだ少ない」ように感じられる。

もし、I4.0 や DX の推進が、経営上正しい意思決定であるにも関わらず、日本企業が閉塞状況にあるのであれば、日本企業特有の要因があるはずである。

3. 「システム化」からみた I4.0・DX の捉え方

I4.0・DX をどう捉えるべきか。「研究会報告書」を基に一部補足しつつ解説したい。

3.1 イノベーションを駆動するのは「システム化」である ([1] の 1 章)

I4.0 や DX に関連して紹介される「データの収集・蓄積・分析、AI などの新しいツールや技術」を効率化に活用することも重要である。しかしながら、より重要なのは、限界費用ゼロの資源であるソフトウェアを事業成長のためにより広範囲に活用できるように、企業経営はもとより、広く産業の仕組の「システム化」を図ることである。

3.2 I4.0 は「システム化革命」である ([1] の 2 章)

I4.0 は CPS (Cyber Physical System) だと、その提言書 [3] で定義されているので自明ではあるが、I4.0 は産業や社会の仕組の「システム化」である。

ただし、日本では、「IOT, AI, クラウドなどの先端的な要素技術を活用して、即効性のある“何か”を実現すること」という解釈がされているケースが多いように筆者は感じる。このため企業経営全体や産業の仕組の「システム化」の視点は強調すべきと考える。

本稿では、I4.0 や DX に伴う経済現象を捉えるに際し、産業の仕組の「システム化」に対して、「システム」の「構造」と「調整機構」との 2 つの視点からの整理を試みた。

3.3 「システム構造」の変革

3.3.1 「垂直連鎖構造での製品事業モデル」から「多階層でのサービス事業モデル」へ

I4.0 や DX は、価格破壊がすすみ、かつ限界費用ゼロに近くなってきたクラウド型のコンピュータ資源を活用しつつ、産業のシステム構造の変革をもたらしつつある。この構造変化を、「垂直連鎖のピラミッド型構造での製品販売事業モデル」から、「オープンで柔軟な水平ネットワーク構造での PSS (製品サービスシステム) 事業モデル」への構造変化として捉えたい。

「垂直連鎖のピラミッド型構造での製品販売事業モデル」とは、最終製品の製造物責任を負うメーカーを頂点とし、頂点のメーカーの設計仕様に基づき、多重下請け構造で部品や資材などの調達を行う。頂点となるメーカーの設計仕様の変更には企業グループ内での暗黙知による柔軟な擦り合わせが行われる。企業グループ内で取引が閉じているケースも多く、関係特殊性資産への投資を厭わないことが多い。最終製品のいわゆる直接業務である、資材、加工、部品、組立製造・販売という業務機能を、規模と範囲の経済から傘下の企業が担いこれが垂直に連鎖する構造である。

これに対し、新しい産業システムの構造は、各種の間接業務機能を外部への業務機能サービスとして事業化した「サービス事業モデル」である。この時、安価になったクラウドサービスを活用したソフトウェアサービスとしてスケールアウトできる領域を切り出すことが行われている。

間接業務機能とは、具体的には、製品サービスの企画・マーケティング機能、製品サービスの設計機能、生産技術・製造設備 (ソフトウェアを含む) 設計機能、製造サプライチェーンの設計機能、計画機能、製造管理 (品質・原価) 機能、製造実行機能、品質を含めた製造履歴管理機能、製品利用時の利用履歴の管理機能、保守・運用サービス機能、ファイナンス機能などの“各種業務機能”である。

これまでにも、物流や IT、経理、製造などの領域では、「アウトソーシング」という言葉で取り上げられてきた現象である。近年、AWS, GCP, Azure などの「コン

「コンピュータ資源のクラウドサービス」を活用することで、「クラウド型の業務ソフトウェアサービス事業」が展開可能となったわけである。

こうした「クラウド型の業務ソフトウェアサービス事業」が、業務機能モジュール間のインターフェイスの国際標準化により、オープンで柔軟な水平ネットワーク型のエコシステムが形成され、いわゆるマルチサイド（需給両面）で活用されることにより、参加する企業数が拡大、ある閾値を超えることによりネットワーク効果で急成長のフェーズに入る。さらに、これらの「クラウド型の業務ソフトウェアサービス事業」を複数組み合わせ、主に成長余地の大きい新興国市場を対象としたサービス事業モデルが登場している。これらの総称が、いわゆる“プラットフォームサービスビジネス”と考えるとわかりやすいのではないだろうか。

特に、I 4.0 では、製造業が従来は顧客企業の間接部門が担当していた運用・保守業務を含むライフサイクル管理全体の包括的サービスとして、PSS（製品・サービスシステム）を提供するアイデアが提示され、既に事業化されはじめている。もっとも製品や設備に詳しい製造業がその知見を活かして関連する運用・保守サービスを提供するというアイデアは、I 4.0 よりも依然から「製造業のサービタイゼーション」[4]として研究されていたテーマであった。

3.3.2 台頭している多様なプラットフォームビジネス

「研究会報告書」でも一部紹介しているが、GAFAM 以外にも、既にいくつかの産業では、クラウドサービスとインターフェイス（以降「IF」）の国際標準を活用した業務基盤のプラットフォームサービスが複数登場し成功している。

背景には、企業間 EDI の国際標準に始まり、相互運用性を担保する各種モジュール間 IF の国際標準化の進展がある。このため国際貿易物流産業や、国際分業体制が早期に構築され国際標準が確立されたアパレル産業でのプラットフォームビジネスの成功例が存在している。下記はその一部の例である。

- ① アパレル調達・生産・流通エージェントプラットフォーム (LI-FUNG)
- ② 国際コンテナターミナル運営受託サービス (PSA)
- ③ 国際利用貨物プラットフォームサービス (Cargo Wise)
- ④ 社会基盤のライフサイクル管理の統合プラットフォーム (Bentley Systems)
- ⑤ グローバルな小口金融（融資、決済、購買支援、越境 EC、投資）サービス (Ant ファイナンス)
- ⑥ 石油・化学プラントの企画・開発、運用・保守サービス (Schneider)

⑦ 製造ノウハウのクラウドサービス事業 (BOSCH)

これらの GAFAM 以外の個別産業における業務基盤のプラットフォーム事業は日本ではあまり話題になっていない。また日本企業で当該領域に事業展開している企業はほとんどいないように見受けられる。

これは、国際標準のモジュール間 IF、例えばグローバルな EDI などを活用する環境が日本国内には乏しいために、欧米では常識になりつつある「国際標準を基礎とし、当初からグローバル市場を視野に入れたプラットフォームサービス事業」が現実感に乏しく、発想しにくいことが背景にあるのかもしれない。

3.3.3 産業レベルでの「システム構造変革」に関連した研究蓄積

実は、こうした「プラットフォームサービス事業モデル」などへの「産業のシステム構造変革」は、I 4.0 や DX により、はじめて提唱されたわけではない。

全てを網羅的にあげることはできないが、代表的なところだけでも、デジタル技術により「取引コストが低下すると企業組織の境界が組織側へシフト [5]」する、つまり、市場調達が拡大するというのは、「市場と組織」(Oliver E. Williamson) の時代から伝統的に語られてきたし、さらに 21 世紀に入ってから、これまで米国の主にビジネススクールを中心として、さかんに提唱されてきた。モジュール化パワー [6]、オープンイノベーション [7]、オープン・サービスイノベーション [8]、コンセンサス標準戦略 [9]、ダイナミックケイパビリティ [10]、製造業のサービタイゼーション [4] など、製品や企業、産業をシステムとみて、いわば「システム」の構造変革を題材にするアイデアが、ビジネススクールの戦略論やオペレーションズマネジメント (OM) の領域では議論されてきていたのである。

3.4 「システム調整機構」の変革

I 4.0 提言書 [3] では、工場のフィールドレベルでは仕掛品と生産設備との直接コミュニケーションにより、オペレーション指示の複雑性を解消するアイデアが提示されている。

この他、RAMI 4.0 (4.2 節で後述) では、企業間の情報交換や企業間取引も対象としているため、調整に一定の時間を要する (スポット) 市場型価格調整メカニズム (PQ 調整) だけでなく、不確実性を内生化した取引モデルも採用されると考えられる。この際には、金融工学や流通における CPFR (collaborative planning, forecasting and replenishment) 等の PQ σ T 調整 [14] などの (中期) 調整機構も必要となる。

さらに、最近では、データは所有者が保持する分散型保有を前提とした企業間情報交換と履歴管理の仕組

(IDS[11], FI ware[12], AAS [13], Block chain) が検討されている。

こうした数理アルゴリズムを活用した取引モデルは、デジタル化された「スマートコントラクト」に実装しやすく、スケールアウトできるため（短期の調整機構として）重要である。

一方、日本企業が得意な阿吽の呼吸はデジタル化が難しくスケールアウトが難しいという弱点がある。製品を取引する場合と異なり、サービスを取引する場合の契約は、契約そのものが複雑にならざるを得ない。今後、一層の研究が必要な領域であろう。

さらに、事業部門（SBU）の調整機構モデルについても変革が求められている。従来の財務 KPI による多階層組織の年度予算管理型から、経営環境変化への適応力を向上させるための組織全体の機敏な調整が可能なマネジメントプロセスである IBP・S&OP[15] なども必要となると考えられる。IBP・S&OP や前述の CPFR のアイデアは、日本発の TPS（トヨタプロダクションシステム）をモデルとし、経営環境の不確実性に対する機敏な適応力を向上させることでオプション価値の創造を行っている」と筆者は考えている。IBP・S&OP や CPFR（長期の調整機構）は、欧米だけでなく既に中国や東南アジアを含む海外でも先進企業には定着しているようである。一方、日本企業での採用はまだ少なく財務 KPI による多階層での年次予算管理方式が中心である。

いずれも、部門（機能組織）や企業の境界を越えて、産業システムが、あたかも 1 つの「生命体のような“制御機構”」として環境変化へ迅速に適応できる、経営レベル、企業間レベルでの調整機構、ひいては産業システム全体の調整・制御機構の設計が、メサロピッチが提唱した「階層システム論」的に構成されようとしていると考えると興味深い。

この「産業システムの制御機構モデル」は、旧来の製品取引における「市場機構モデル」に対応する新しいパラダイムと考えられる。

I4.0 が対象とする、製品サービスシステム（PSS）の対象は、製造業だけではなく、スマートシティや交通機能（MaaS）他、ソサエティ 5.0 が対象とするかなりの領域も対象となる。例えば、エレベータや空調、エネルギー管理なども PLC（programmable logic controller）によるコンピュータ制御になるからである。

日本では、現場が柔軟で機敏、かつ優秀であったために、細かな調整機構の設計は必ずしも必要なかった。この点は、日本企業が新しいパラダイムを過小評価する理由の 1 つになっているかもしれない。

しかしながら、デジタル技術をスケラブルに活用するにはきめ細かな調整機構が必要となる。逆に、こうした現場の暗黙知である調整機構のノウハウを形式知化

し、ソフトウェアに実装、かつての TPS（トヨタプロダクションシステム）の例のように日本から革新的な調整機構のモデルを世界へ提案していける可能性は大きいと筆者は考えている。

4. 再考：4次産業革命

4.1 CPS の 3 つの基本方向

I4.0 提言書 [3] で提案されている CPS 活用の 3 つの基本方向は、産業の「システム化」、つまり「システム構造」と「システム調整機構」、及び「これらを支える共通基盤」の 3 つと考えると理解しやすいのではないだろうか。下記、「研究会報告書」[1] に詳細は譲るが、対関係を整理しておく。

(1) 価値連鎖（VC：バリューチェーン）の水平統合
「価値連鎖の水平統合」とは、「企業・国境を越えて緊密な国際分業体制を実現するネットワーク」を構築することとされている。製品設計活動だけでなく、人工物のエンジニアリング活動全体（企画～廃棄まで）のあらゆる業務領域において、必要に応じたオープンイノベーションを実現し、最適な国際分業体制を構築することとされる。これは、産業の「システム構造」の革新と解釈できる。

(2) 垂直統合と製造システムのネットワーク化
具体的には「スマートなマザー工場と、共通知識データベースによるグローバルな製造拠点の運用保守管理業務の高度化、設備稼働率の維持」、及び「仕掛品が自ら情報を発信することで設備とのコミュニケーションを行い、より自律分散型の制御の複雑性を回避すること」などである。これは、階層構造を有するシステムとして産業を捉えた際の「システム調整機構」の革新と解釈できる。

(3) エンドツーエンドのエンジニアリングチェーン
(1), (2) を実現するためには、製品だけでなく、製品サービスシステム（PSS）などの人工物の「エンジニアリング活動全体」についての情報を管理していく共通基盤である。

ここでエンジニアリング活動とは、人工物のライフサイクル全体に対する全工学的活動を指す。具体的には、製品企画開発、物理解析（熱伝導・振動・応力解析など）に基づく製品設計、生産工程設計、生産設備設計、生産ラインの設計・シミュレーション、製造履歴情報、製品の運用モデル、保守モデル、部品の利用負荷履歴情報、廃棄工程の設計などである。

4.2 RAMI 4.0の目的は「政策的なオープンイノベーション」の推進

I 4.0の主活動は、RAMI 4.0（レファレンスアーキテクチャモデル Industrie 4.0）による国際標準化活動である[3]。これは、前節での3つの方向を具体化するためには、「システム構造」（空間軸）と「システム調整機構」（意味軸）、さらに「エンジニアリング情報を共有、運用・制御していく情報基盤」（時間軸）の3つの軸から構成されるPSSの位相空間におけるシステムアーキテクチャの設計活動が重要であるからである。

システムアーキテクチャの設計活動とは、位相空間上のモジュール構造の設計、モジュール間IFの国際標準化、各種言語体系やセマンティック、ロードマップなどの「レファレンスアーキテクチャ」を作成する活動である。

では、なぜ新産業のシステムアーキテクチャの設計活動を国際間の協調体制で行うことが重要なのだろうか。それは、システムアーキテクチャの設計活動自体が、ドイツだけでなく世界を巻き込んだ「政策的なオープンイノベーションの場となる」からである。実際、ドイツは日本を含む世界主要国とI 4.0の標準化活動に対する前競争的な協調活動の覚書を締結している。

I 4.0、特にその中核であるRAMI 4.0は、3.3.3節の研究蓄積やアイデアを基礎に、これらのアイデアを実現するための課題であった「コンセンサス標準としての産業のモジュール構造設計」、つまり「産業のシステムアーキテクチャについてのコンセンサスの獲得の方法」について、ドイツ科学技術アカデミーが出した解答のように、筆者にはみえる。

つまりRAMI 4.0のねらいは、「今後の成長産業である“製品サービスシステム（PSS）”という新産業に対して、ドイツが得意とする“国際標準化活動”による“システムアーキテクチャの設計作業”をドイツの産業政策として行うことで、PSS領域でのオープン・サービスイノベーションを加速すること」と考えられるのではないだろうか。

4.3 「独 I4.0 研究評議会提言」[16]での今後の研究テーマの考え方

最新の「独 I4.0 研究評議会提言」[16]では、「PSS（製品サービスシステム）での価値創造」をテーマとして設定、企業の境界を超えた動的で柔軟なバリューネットワークを基礎としたデジタルエコシステム上で、PSSを中心としたビジネスモデルへの転換による価値創造が提案されている。また、企業としての変革方法論も研究テーマに挙がっている。スマートコントラクトや分散台帳技術（DLT：Distributed Ledger Technology）など、モジュール間取引契約等の調整機構も重要な研究テーマと

して挙がっている。

<参考> 「独 I4.0 研究評議会提言」[16]における今後の研究テーマ

研究テーマは下記の4つの領域から構成される。ここでは紙面の関係で、価値創造シナリオを中心に引用と概略について紹介をする。技術だけを取り上げているわけではないことに注目したい。

- I 4.0の価値創造シナリオ
- 将来の技術トレンド
- I 4.0のための新しいメソッドとツール
- 働き方と社会

< I4.0の価値創造シナリオ>

- ① 製品・サービスを仮想化した持続可能な価値提供
 - 製品とサービスを包括的なサービスパッケージとして、PSS（製品サービスシステム）を開発・実装し、さらに仮想化すること
 - 多様な顧客利益を継続的に設計すること
 - サービス提供に際して、データ主権を担保しつつ個別サービスを設計することで顧客を巻き込んでいくこと
- ② データドリブンなビジネスモデルと収益構造の革新
 - PSS ライフサイクル全体をカバーする柔軟で動的な収益構造を構築すること
 - 売買対象としてのデータについて、価値評価、市場の創造、活用範囲の承認方法の設計など
- ③ 価値創造アーキテクチャの更なる開発
 - 柔軟性に乏しい現在の（企業グループに限定された）価値連鎖（VC：Value chain）から、デジタルエコシステム上の高度に柔軟かつ動的、企業の境界を越える価値ネットワーク（VN：Value Network）の開発を行うこと
 - 価値ネットワーク（VN）でデジタルツインを円滑に活用できるようにすること
 - 重要な顧客インターフェイスを戦略的に確立すること
 - PSSのライフサイクル全体を考慮した事業経営とその持続性を担保すること
 - データドリブンでプラットフォームを基礎とするビジネスモデルへの経営組織の変革と再構築を行うこと
- ④ 持続可能な経営戦略の開発と実装
 - 最適な資源効率性、持続可能な経営の方法
 - 自動化、遠隔管理、輸送距離の最小化、3Dプリンター活用など

- ・ 仮想空間でのプロトタイピングによる物理プロトタイプの削減
 - ・ 自動車用電池の固定位置での活用などの再利用オプションの検討
- ⑤ スマートコントラクトと分散台帳技術（DLT）の持続可能性
- ・ 最適な資源効率性、持続可能な経営の方法
 - ・ スマートコントラクトの自動生成手法
 - ・ 品質、経済価値、技術実証に加え、制度面での検討が必要
 - ・ 分散台帳技術（DLT）とスマートコントラクトの法制度面での検討
 - ・ 暗号通貨がデジタルビジネスモデルへ与えるインパクトの分析

5. 「システム化」が要請するパラダイムシフトの諸相

I4.0・DXは、「システム化」つまり産業のシステムの構造と調整機構の再設計を行うことであり、この結果、従来の産業システムに対し、幅広く下記の多様な領域全てに同時並行で変革を要求してくる、いわゆる「パラダイムシフト」である。

- ・ 製品やソリューション開発の方法
- ・ 製品販売事業モデルから、製品・サービスシステム（PSS）事業モデルへの変革
- ・ 製造業の競争環境の変化
- ・ 産業政策と科学技術政策（産学連携）の変革
- ・ 働き方や教育、特に社会人教育の変革

「研究会報告書」では、「システム化の遅れに起因する日本の弱点」や「システム化が遅れた背景」の分析を行った。本稿ではさらにこれに追加し、I4.0やDXが求めるパラダイムシフトの諸相を整理することで、当該パラダイムが日本企業のこれまでの成功体験の背景にあるパラダイムと大きく異なることを整理し強調したい。

パラダイムシフトへの対応を迫られている日本企業や政府には、①俯瞰的、かつ長期的な視野から、②産業システムやそれを取り巻く社会システムの問題構造を認知し、③分析、解決策を設計、副次的に発生する問題解決を含め、新しいパラダイムの下での産業システムを具体化し、変革していくことが重要である。

新しいパラダイムの下で、いわゆる規模の経済、範囲の経済を超えた、いわば「システム（制御機構）の経済」のウェイトが拡大することが予想される。こうした時代に向けて「産業システムの変革」が必要である。

また、同時に、変化する環境下での変革の方法論自体の設計も大きな課題である。

5.1 製品・ソリューション開発の方法の変革

5.1.1 自前主義モデルから政策的なオープンイノベーションモデルへ

製品・ソリューション開発の方法が、「特定企業のエンジニアだけで行う自前主義モデル」から、「産業システムのレファレンスアーキテクチャの設計をコンソーシアム形式で行い、これを国際標準として公開する」という政策的なオープンイノベーションモデルへ変化してきている。標準化はオープンイノベーションを推進する推進力だからである。

- ① システムの設計から何段階かの階層構造を経て要素技術の設計が可能となる。
- ② 継続的なイノベーションは、モジュールを入れ替えることにより行う。
- ③ このためモジュール間インターフェイスの標準化が必要となる。

特に、日本では“標準化はイノベーションを阻害する”という考え方がまだ多いが、ここでいう標準は技術そのものの標準ではなく、特許性のない「モジュール間インターフェイス」の標準であることに留意すべきである。

研究会では、欧州、日本双方の製造業で開発部門を経験した方へのヒアリングを行った。「日本企業での製品開発は、開発途中で、いわゆる“すり合わせ”と称したやり取りが多発し、一見賑やかだが摩擦が多いといえる。

これに対し、欧州では最初に基本となる製品アーキテクチャを設計し、皆それに従うので手戻りが少ない。どちらが最終的によいかは不明だが、日本企業でも基本となる製品アーキテクチャを最初に設計する方法を採用すれば、製品開発はよりスムーズに進むと思う。」ということであった。

日本企業のうち何割が該当するか不明であるが、筆者の経験からはかなりの企業が同様の状態という印象である。つまり、オープンイノベーションを行うための、アーキテクチャ設計活動そのものが、日本企業では馴染みがない方法という可能性があると考えられる。もし、そうであれば、I4.0が提唱しているRAMI 4.0の活動の意義を理解できる企業は、極めて少ないことになる。

次の前競争的活動も、欧米では企業内で行われている活動を外部の企業とも行っているだけである可能性が高い。

5.1.2 前競争（Pre-Competitive）的活動と競争活動

産業システムのアーキテクチャ設計活動は、当該産業にかかわるユーザー企業や関心を有する企業（ベンダー）が、標準化機関などの支援の下でコンソーシアムを形成し、前競争的な活動として組織的に行われることが多い。

前競争的な活動とは、主に下記の4つである。

- ① 新産業の需要表現 (Demand Articulation) [17]・外部機能・仕様の具体化
- ② 構成要素のモジュール化 (内部構造の設計)
- ③ モジュール間インターフェイスの国際標準化
- ④ 全体のロードマップとレファレンスアーキテクチャの作成などである。

産業システムのアーキテクチャ設計は、特許性のないモジュール間インターフェイス、個々のモジュールの機能構成がアウトプットであるため、独占禁止法の適用除外とされ、競合企業が参集して議論できる前競争的活動と位置付けられている。

競争 (Competitive) 活動は、①構成要素である機能モジュールの技術開発・提供活動、②モジュールを組み合わせるコーディネーションと統合システムとしてのサービス提供活動で行うということになる。

5.1.3 政策的なオープンイノベーションの優位性

政策的なオープンイノベーションモデルが自前主義モデルよりも優位な点は、主に下記の4つである。

① マーケティング面

自前主義では、顧客の潜在的なニーズを明瞭な姿で捉えることは容易ではなく、マーケティング (市場開拓) 活動の費用と期間を要する。また特定顧客のニーズに対応した設計ではリスクも大きい。

政策的なオープンイノベーションでは、複数のユーザー企業が当初から参画したコンソーシアムにより、新産業の外部機能設計が行われるためにユーザーニーズが早期に明確化され、マーケティングやセールス活動の費用、期間、リスクは小さくなる (需要表現 [17])。

② 技術開発の意思決定の迅速性と低いリスク

複雑な産業であればあるほど、技術の将来像が見えにくく、技術開発の焦点・目標を定めにくい。技術開発力そのものよりも、「何を開発すればよいのか」という点が明確でないため投資が分散する」ことが問題という指摘は多い。特に、他社が既に有する既存技術が不明であることが生産性を下げている。

政策的なオープンイノベーションでは、コンソーシアムにユーザーだけでなく競合ベンダーも参加しているため、競合他社を含め、既存技術が適用できる場所はどこか、新たに開発しなければいけない技術モジュールは「何か」、いつ頃までに必要か、その需要規模はどの程度か、が示されることになる。この結果、最も重要な情報、誰も既存技術を有していないいわゆる「新規技術開発必要領域 (ミッシングリンク)」の発見が容易になり、投資領域を早い段階で絞り込むことができるわけである。

③ ファイナンス

自前主義での投資意思決定は、頂点企業の当該期のキャッシュフローに依存することが多い。安定的な研究開発投資は容易ではない。

政策的なオープンイノベーションでは、リスクマネーが投入できるメリットがある。明らかになったモジュール構造の下で、既存技術が存在しない領域、ミッシングリンクが発見された際に、技術開発にリスクが伴うものについては、ベンチャーキャピタルやファンドなど資本市場からのリスクマネーの投入が可能となる。資本市場からの資金調達が可能になる効果は大きい。

④ 継続的なイノベーション

自前主義では、開発された製品やサービスの継続的なイノベーションについても、モジュール化がなされていないため外部からの技術提供を受けづら

い。政策的なオープンイノベーションでは、モジュール組み換えによるオープンな (開放系) イノベーションが容易である。モジュール間インターフェイスが公開されることにより、グローバルに、かつ他業種からも参入が進むことで継続的なイノベーションが容易となる。モジュールパワーのオプション価値 [5] である。

5.2 製品サービスシステム (PSS) 事業への変革

5.2.1 「製品販売事業モデル」から「水平分業を基本とする製品サービスシステム事業モデル」への変革

製品ではなく、PSSとしての産業全体について、競争的活動が、①機能モジュールの提供活動、②「統合システムとしてのサービス提供」とに、分解と新結合されると、個々の事業者の事業モデルもそれに従って変革が求められることとなる。

この結果、製造業のビジネスモデルが垂直連鎖構造での「水平分業を基本とする新たなサービス事業モデル」へシフトしていく。I4.0ではこれを、価値ネットワークと呼んでいる。

具体的には、「製造業のサービス化」、いわゆる“サービスタイゼーション、プラットフォーム事業、イネーブラー事業”という、3つのタイプのサービス事業モデルが台頭してくると予想される。

- ① 製造業のサービスタイゼーション [3]
- ② プラットフォーム事業 [7]
- ③ イネーブラー (要素モジュール) 事業

5.2.2 製造業のサービスタイゼーション

「製造業のサービスタイゼーション」がなぜ重要なのか、筆者の経験からは下記の5点がよく話題になる。

① スケールアウト可能で高い ROA

製造業のサービス化は、限界費用ゼロのソフトウェアを活用したスケールアウトできるビジネスモデルへの転換である。限界費用ゼロで ROA が高いソフトウェアのウェイトの高いサービス事業へと転換を図るとのことである。クラウドサービスが基本で、ブラックボックス化も容易となった。

② 事業の成長性

製造ノウハウ提供のサービス事業として参入することで、製品事業では参入が容易ではないが、成長性が高い新興国市場への「早期参入」が可能となる。成長性が高い新興国では、1人当たり GDP の水準は低く、先進国の製品を今すぐ販売できるわけではない。ダウングレードした商品を企画・設計・製造・販売することもかえってコストがかかる。このため、製品販売事業では一定の経済水準に達するまでは参入は容易ではない、という考え方が日本の製造業の常識だろう。

一方、考え方を転換し、新興国に既に強いニーズがある製造業の技術やノウハウを、クラウドを基礎としたソリューションサービス事業として提供できれば、即参入可能な市場になる。

③ 事業の安定性

10～20年の長期契約のサービス事業は、短期売上はみかけ上小さくとも安定収益が見込めるため企業価値へ与える効果は実は大きい。もともと、設備型の製造業での大きな悩みは景気変動に大きく影響を受けることであった。サービス事業は設備投資に依存しない継続性のある安定事業であり、景気変動の影響は少ない。ホールディングス傘下にサービス型の事業を設置すれば、全体事業のポートフォリオが構築でき、企業価値（EVA）の拡大を図ることが可能となる。

④ イノベーションの内部化

PSS における RAMI 4.0 が国際標準として設定され、産業のアーキテクチャが確立すれば、CPS 領域でのオープンイノベーションが急展開する。多数のプラットフォームやイネーブラーが活用可能となる。顧客と長期のサービス契約を締結し顧客フロントの立場を維持できれば、プラットフォーム事業やイネーブラーのイノベーションを自社の収益構造に内部化できるわけである。

⑤ ねらいは株式時価総額の向上

製造業のサービタイゼーションのねらいは、今期、来期の PL ではない。事業が、(i) スケールアウト可能でかつ ROA が高く、(ii) 成長性、(iii) 安定性、(iv) イノベーションが内部化できることを高く評価するのは、投資家である。この結果、株式時価総額

の向上を図ることができる。

日本では「製造業のサービタイゼーション」は、経営層の関心を引くことは少ないようである。経営幹部の業績評価という視点からすると、今期の売上・利益に結び付かないのでは、うまみがないと評価されるからである。「製品事業」パラダイムに典型的な短期志向の業績評価の陥穽である。

5.3 競争環境変化の変化と企業戦略の考え方

製造業のサービタイゼーションが拡大すると、製造業の製品市場、資本市場両面での競争環境が一変する。製造ノウハウのクラウドサービス事業を、多数の先進国製造業が新興国製造業へ提供することが予想される。ソフトウェアを基礎としているためスピードは速い。

この結果、製品市場、資本市場両面で、日本の製造業の競争環境が一変すると予想される。

(1) 製品市場の変化

新興国の製造業との厳しい競争が予想される。新興国製造業は、欧米の製造業が提供する製造ノウハウのクラウドサービスを活用することで、高度な製造技術を活用できるようになる。新興国の製造業の技術が事実上急速に高度化する可能性があり、安価な人件費を活用した低コスト製造業が出現する可能性が高い。

(2) 資本市場の変化

先進国製造業との厳しい競争となる。サービス化した先進国製造業は株式時価総額を向上させることができるからである。

日本の製造業がスケールアウトできない製品事業だけに固執する場合、製品市場では新興国製造業と、資本市場では先進国製造業との厳しい競争に直面し、板挟みの境遇に追い込まれていく危険性も高いと考えられる。

5.4 産業政策と科学技術政策、産学連携のあり方の変革

新しいパラダイムでの動きを反映して、産業政策や科学技術政策、産学連携のあり方が、既に大きく変化してきている。研究会報告書でも紹介した米国 ERC に加えて、独フラウンホーファ（以下 FH）研究所、パロアルト研究所などがある。基礎研究はオープンに世界中の技術を探索・活用する。また、製品開発やソリューション開発では、世界中の企業のニーズを、受託研究を行うことで把握するという仕組みである。

(1) 米国 ERC（「研究会報告書」5章 [1]）

基礎・応用・実用を連携させる研究プロジェクトを比較的長期で推進することに成功してきたのが、ERC である。ERC は NSF のファンディング・スキームであり、

ニーズ駆動型の学際的研究の推進を目的として多数の大学にプロジェクト形式で設置されている。特に注目されるのは、三階層アーキテクチャによる研究活動の「システム化」である。「研究」と「社会実装」の連携は、「システム」「イネーブラー」「要素技術」の三層図に基づき、長期の研究活動が企画・実施・評価・公開されローリングされている。三層図により、常に3つの階層が同時に検討され、個々の研究テーマの価値評価がシステム全体の視点から常に行われる。

(2) フラウンホーファー (FH) 研究所

FH 研究所はドイツ全土に 72 の研究所・研究ユニットを持つ欧州最大の応用研究機関である。研究所の機能面でのポイントは、大きく次の 3 点と考えられる。

- ① ニーズ駆動型研究開発のオープンな受託サービス
州政府や連邦政府の委託もあるが、民間からの技術研究開発の受託が収入の過半を占める。受託は SME やスタートアップを含めて行う。この結果、民間企業の R & D ニーズを的確に把握しニーズ駆動型の研究を推進できる。共同研究ではなく納期と研究成果に一定の責任を負う受託研究という点が重要である。FH 研究所のアドバイザーボードを通じて実業界と緊密な関係を構築することが基本であるが、顧客企業は多様かつオープンである。独企業とも限らない。たとえば、南米にも FH 研究所が多数展開し受託研究を行っている。日本企業もクライアントに名を連ねている。FH 研究所のダイナミズムはオープンな受託研究活動が基本にある。
- ② 世界の COE とのオープンなネットワークの形成
FH 研究所は、必要に応じて世界中の基礎研究の成果を活用するというスタンスであり、ドイツが誇るマックスプランク研究所はもとより、世界の COE (基礎研究機関) とのネットワークを形成している。日本も例外ではなく、仙台にも研究拠点を設置している。
- ③ 基礎・応用・実用研究の連携の実現
FH 研究所は大学に付置する形態で設置され、すべての FH 研究所長は大学教授が兼務することになっている。FH 研究所長は、製品開発のスタートアップ企業の CEO を兼務することも多い。つまり、大学教授と FH 研究所、スタートアップ企業のヘッドをすべて兼務することができる仕組みである。基礎・応用・実用研究を緊密な連携で行うには効果的な方法であろう。

(3) パロアルト研究所 (PARC)

オープンな受託型研究所として、近年あらためて注目されているのが米国 PARC 研究所である。PARC は、ゼロックスの R&D 部門であり純民間の研究機関であるが、

近年、外部からの受託研究を拡大してきている。CEO のクルトグル氏は「外部からオープンに R&D を受託研究することによって研究活動は加速した。何より世界中の企業とニーズ、シーズ両面でのネットワークが形成できる価値は計り知れない」と語ってくれた。

残念ながら日本では類似の機能は存在していたとしても企業など各組織で閉じた活動にとどまっていて、シーズとニーズの両側にオープンなネットワーク効果のレバレッジが効いていないのではないかと考えられる。

5.5 働き方や社会人教育の変革

I 4.0 では、働き方や社会人教育の変革についての議論が重要と指摘されている。これを受け、独労働省が検討した成果が WORK 4.0 白書 [18] として公開された。IG Metal (ドイツ最大の産業別労働組合) 代表のホフマン氏が、一昨年来日した際に、WORK 4.0 についてシンポジウムで司会とパネラーとして意見交換を行う機会があった。WORK 4.0 の概要は下記である。

- ① 外部人材の調達は今後拡大する。企業組織形態の変革が起きる可能性が高い。広範囲の先進技術の十分な社内教育は容易ではないからである。
- ② テレワーク可能な業務が拡大する。デジタル空間での高付加価値業務が拡大するからである。
- ③ AI を活用することで、大規模なタスクとスキルのマッチングが可能となる
- ④ 就業者は徐々にクラウドワーカーになっていく。これは、プロジェクト契約でテレワークを行うフリーランスである。特徴は人月の労働時間ではなくアウトプット契約でかつ複数企業と同時に契約可能な働き方である。
- ⑤ 就業者は技術革新に対し継続的に学習し続けることが重要。就業者には公的ファンドで就業者自らが教育投資を管理できる仕組みを整備すべきだ。例えば年間 200 万円程度を学習費用として公的に負担すべきという提案が政府からなされた。
- ⑥ 細かい粒度で過去の就業経験や教育内容などの人材の経験やスキル情報を整理しておくことが生産性向上に重要となる。仲介斡旋サービスであるクラウドソーシングへの参入障壁を下げるのが有効だからである。
- ⑦ クラウドソーシング事業者の評価公表サイト、フェアクラウドワークを IG Metal が運営している。
- ⑧ 例えば、クラウドワークソーシング事業の運営行動指針は下記の項目から構成されている。
 - タスクの適法性／両者の法的地位の明確化／公正な支払／モチベーションと良質な働き方／当事者 (ワーカーとユーザー) を尊重した事業運営

／タスクの明確な定義づけと十分な時間計画／
業務タスク（＝プロジェクト）の時間的場所的な
「自由と柔軟性」（長期固定は認められない）／建
設的なフィードバックと開かれたコミュニケーション／事前ルールに則ったタスクアウトプ
ット受領のプロセスとリカバリー／データ保護と
プライバシー

シンポジウムで筆者からホフマン氏へのコメント「就
業者1人あたり公的資金200万円を供与し社会人の学習
機会を創造するのは素晴らしいアイデアですね。」に対
して、ホフマン氏は「私は反対している。学習意欲のあ
る就業者に金額の上限を設けることは誤りだ。全て無償
にすべきだ。大学側も効果的な教育カリキュラムを常に
研究開発していかなくてはいけない。その予算も潤沢に
確保すべきだ」というものであった。わが国も労働組合
側からこのような要望があってもよいのではないかと感
じるのは筆者だけであろうか。

6. 求められるシステム変革と変革方法論の研究

I4.0やDXは、既存パラダイムから新しいパラダイ
ムへのシフト（変革）を自然と要求している。産業やそ
れを取り巻く社会システムの幅広い分野において、シス
テムの構造と調整機構、製品やソリューション開発の方
法、競争優位性確保の考え方、対象市場、価値創造や企
業戦略の考え方、業績評価の考え方、産業政策と科学技
術政策の基本的な考え方、働き方や社会人教育の考え方
など、関連する多数の分野で同時並行の変革を行うこと
が必要となる。

I4.0やDXでは、POCで個別の問題を部分問題とし
て定義し解決法を探索するだけでなく、その問題を取り
巻く大きなパラダイムシフトを理解した上で、産業シス
テムの変革を行うこと、さらにシステム変革方法の設計
が求められている。

Martin [19]では、「7-SAMURAI」として、システム
変革についての考え方を提案している。I4.0、DXの文
脈に即して解釈すれば、①対症療法の部分問題の解決を
目指すボトムアップのPOCだけではなく、②変革後の
全体システム（新産業システム）を構想した上で、個々
の解決策を位置づけた上で全体システムの詳細設計を行
うことに加え、③新しい産業システムを持続可能にする
ためのインフラシステムの変革や整備を同時に行うこと
が重要と考えられる。

ここで、インフラとなるシステムとは、例えば産業政
策と科学技術政策、働き方や社会人教育、さらに新社会
システムの設計や変革のための、いわば広い意味での産
業社会のシステムのイノベーション（変革）の研究・教
育・政策立案の仕組であろう。

7. 結び

I4.0やDXは長期的な視野で、かつ俯瞰的に社会シ
ステムを捉えていかなければ観えてこない「パラダイム
シフト」である。

日本の対応が遅れているという指摘も少なくない。も
し、その指摘が正しいのであれば、理由は「過去の成功体
験を支えた、規模の経済や範囲の経済を追求し、企業グ
ループ内の自前主義での製品開発、多重下請けピラミッ
ド型の産業構造で、量産型、主に品質とコストを競う
“製品取引の市場機構モデル”のパラダイム」と「製造
業のサービタイゼーションやプラットフォームビジネス」
などの台頭の背景にある「“システムの経済”を追求、
オープンイノベーションや限界費用ゼロのクラウド
型ソフトウェアを活用し、スピードとスケール、ダイナ
ミックケイパビリティを競い、“サービス事業(PPS)”か
ら構成される“産業全体のシステム制御機構モデル”の
パラダイム」があまりにも大きく異なることではないだ
ろうか。

日本にとっては、過去の成功体験からの脱却が必要と
なるため、パラダイムシフトへ対応したシステム変革を
行うことは容易ではないのである。

もちろん、筆者は楽観的である。かつて米国はトヨ
タ自動車の米国工場でのJIT、TPSのパフォーマンスの
高さに驚き、研究の末、ビジネススクールの科目POMS
を新設、オペレーションズマネジメント(OM)を必須と
した。さらに、当該領域の重要性をホワイトハウスに訴
求し、今やOMは経営層の常識となった、研究者のコ
ミュニティである米国POMSは現在1万人の教授陣を
抱え、研究活動も活発化、知識体系も高度に発達して
きた。今度は、日本の学会が、閉塞している日本をモ
デルに、新しい社会システムへの変革方法論を設計、提
言することで世界へ存在感をアピールしてみたいかだ
ろうか。

横幹連合は、わが国の科学技術を従来の「モノづくり」
偏重から転換させ、21世紀の日本社会、世界の直面す
る諸問題を総合的に解決することのできる、「社会の中
の、社会のための科学技術」を文理融合で推進してきた
課題解決型の組織である。横幹連合の活動に大いに期待
している。

I4.0やDX、OM戦略について、JOMSA（オペレーシ
ョンズ・マネジメント&ストラテジー学会）が主催する世
界POMS大会が、10年ぶりに来年9月に日本で開催さ
れる。欧米はもちろん、世界中からビジネススクールの
OM関連の研究者が集結し、議論を行う。横幹連合の研
究者の方々にも興味深いテーマが多いと考える。是非、
御参加いただけると幸いです。

パラダイムシフトの分析フレームワークと産業シス
テムのイノベーションの内容を付表として末尾ページに記
載する。

付表：パラダイムシフトの分析フレームワークと産業システムのイノベーション

The need for industrial system innovation in Japan
-the conceptual framework of I 4.0 and DX from the paradigm shift perspective-

	Current paradigm (現パラダイム) (Product market mechanism) (製品取引の「市場機構モデル」)	New paradigm (新パラダイム) (Adaptive Control mechanism) (産業全体の「システム制御機構モデル」)
追求する経済性と その背景 (Economy)	「規模の経済」、「範囲の経済」(economy of scale & scope)=売上 拡大、利益の追求 (PL) ・製造設備の稼働率や各種供給ノウハウにおける学習曲線の存在等 により、規模や範囲の経済が大きく収益に影響する。 ・調整は価格による市場機構により行われる。	「システムの経済」(economy of system) =ユーザーを含む産業システム全体の不確実な環境への適応力向上⇨ダイナミックケ イバリティによる経済性 ・環境適応は、階層システム的に実現される。 ・長期のモジュール (PSS) の組み換えと中期のP QσT調整、短期のスマートコント ラクトなど
① 典型的な事 業モデル (business model)	スポット (製品) 市場を中心とした製品販売事業モデル ・製品売買時点で取引は基本完結。出荷後に故障が少なくクレーム やリコールが無いこと品質管理の重点 ・資材、部品 (多階層型)、製品、物流、販売という垂直連鎖モデル	継続的な、製品・サービス・システム (PSS) 事業モデル ・価格破壊かつ限界費用ゼロの経営資源である“クラウド型ソフトウェア”を活用した スケールアウトできるPSS (製品サービスシステム) から構成される産業システム ・最終ユーザーがPSSを利用する時点での利用価値へ貢献する、長期契約でのサービ ス事業モデル ・PSSで、マルチサイド (ユーザー、イネーブラー) のエコシステムを形成でき、 ある閾値を突破できたものが、成長軌道に乗り「プラットフォーム」と呼ばれる。
② 産業システ ムの「構造」 (architecture)	構造 大量生産・多重下請け構造 =「垂直連鎖のピラミッド型構造」 ・産業は、最終製品の製造物責任を負うメーカーを頂点とし、部品な どの売買を取引とする「垂直連鎖のピラミッド型」 ・組立製造業、多階層の部品製造業、加工業、資材他 ・企業グループ内での暗黙知による柔軟な擦り合わせ ・関係特殊性資産への投資を厭わない。	構造 多階層のPSSが水平的に連携する「オープンで柔軟な水平ネットワーク型構 造 (=エコシステム)」 ・対等なパートナーとしてPSSがオープンに連携する統合されたサービスシステムへ ・サービスシステムは、①ユーザー/②サービサー (インテグレータ) /③各種PSS S、④各種イネーブラー/⑤各種コンポーネントから構成 ・関係特殊性資産への投資を嫌い、産業のモジュール化・モジュール間の標準 (可能 な限り国際標準) APIを指向する。このためRAMI4.0などの国際標準化活動が 重要
③ 産業システ ムの「調整機構」 (Operation, Coordination, Behavior)	調整 (企業グループ内) 自前主義の擦り合わせ調整 ・数量調整は、ピラミッド頂点企業の計画に従う計画調整モデル ・数量調整の高度なケースに、TPS (PQσT調整の萌芽事例) も存在 するが、必ずしも一般的ではない。	調整 産業全体があたかも一体的な制御機構として機能する階層型調整機構 ・長期: モジュール (PSS) の組み換え/中期: P QσT調整/短期: スマートコント ラクト ・P QσT調整: 計画情報とその不確実性 σ/μ を明示し共有する契約形態 (例: CPFR など) のP QσT調整、金融工学の適用)での調整 ・スマートコントラクトでオペレーションの詳細をデジタルで調整
④ 競争優位性確 保の考え方 (Competitive Advantage)	品質とコストの競争 ・設計品質はピラミッドの頂点企業に大きく依存 ・製品設計→部品設計→素材設計のフロントローディングを機敏 (アジャイル) に実現する能力が鍵 ・「出荷後は「手離れがよくクレームが少ない製品がよい製品」	顧客利用価値の設計力とサービス品質が競争優位のポイント ・顧客の利用価値を視察でき、統合サービスの高度化へ向けた要求定義を行うことが できる「サービスフロント」のポジション確保が重要な戦略 ・プラットフォームとなるにはマルチサイド (需給両面) オープン化し、閾値を突 破することが重要 ・イネーブラーは世界No.1となる機能モジュールの概念規定と早期の投資が重要
⑤ 対象市場 (target market)	先進国もしくは国内製品市場 ・製品特性が大きくことなるため、新興国市場への参入は容易では なく、時期早尚 ・理由は2点 ①製品市場では先進国と同じ製品は受容されにくい。 ②市場に即した製品開発が必要となり追加コストが必要となる。単 価も低く、利益率も低い。	新興国を包含する成長性の高いグローバル経済 ・成長率の高い新興国経済の製造業のニーズに対して、製品・サービスシステムを提 供することで、早期の参入を実現する。
⑥ 価値創造の考 え方 (Value creation)	成熟市場での大量生産・大量消費経済が暗黙の前提条件 ・良品を安価に提供することで利潤を獲得 ・一方、成熟市場では事業成長スピードには限界	新興国の経済成長スピードを加速することで価値創造を図る ・先進国の製造業関連のあらゆる知識/ノウハウ (製品設計、生産技術、製造技術、保 守運用技術など) を長期契約、かつクラウド型のソフトウェアサービスとしてブラッ クボックス化し、フィー方式で提供 ・複数PSSを統合したサービス事業として顧客フロントを確保する方法もある。
⑦ 企業戦略 の考え方 (Competitive Strategy)	先進国市場におけるシェア拡大で市場支配力拡大、事業の安定性の 確保を狙う	新興国市場への早期参入と長期継続事業の確保、(M&Aなど) 資本市場を含めた総 合的な競争優位性獲得を狙う ・新興国の成長力を内部化、サービス事業としての安定性、ソフトウェア中心で高い ROA、限界費用ゼロでスケールアウトできるオプション価値を、企業価値 (EVA) へ 反映させ、株式時価総額の拡大を目指す ・高い株式時価総額で資本市場 (M&Aなど) を含めた総合的な競争優位性を獲得
⑧ 業績評価の 考え方 (Evaluation)	短期のPL (損益) を追求 ・今期や中期の予算目標の達成実績が企業の信頼性 = 価値 ・多階層での部分組織の年次予算主義 ・SBU毎の財務KPIによる評価 ・営業販売機能へは売上の最大化 ・他の機能組織は、品質が同じであれば、基本的に原価削減 (例: 製造原価、物流原価、調達原価) で評価 ・経営の価値⇨個々の機能部門の業績評価の総和	長期戦略に基づく、EVA (企業価値) の最大化 ・組織全体の将来のキャッシュフロー期待値でもあるEVA拡大、企業価値拡大が目 標 ・経営のオペレーション方式は、経営全体の機敏な調整力を実現するS&OPやIBP方式 が主流 ・経営の価値>>個々の機能部門の業績評価の総和
⑨ 製品やリユ ーション開発の方法 (Method of product & solution development)	自前 (企業グループ) 主義 ・ピラミッドの頂点となる製造業が仕様を決定 ・当該仕様に対し、ベストなQCDを実現する部品や生産技術開発 ・企業グループ内の円滑な調整力が競争力の鍵	政策的なオープンイノベーション方式 ・顧客利用時点の経験価値の最大化を目指してPSSが設計される。 ・政策的なオープンイノベーションとは、産業システムのレファレンス・アーキテク チャ設計に加え、モジュール間インターフェイスの国際標準化。 ・これにより、企画からサービス提供までの時間を短縮、モジュール投資を促進
⑩ 産業政策、科 学技術政策の基本 的な考え方 (Innovation policy)	パイプライン型 ・基礎→応用→実用研究の単線パイプライン型 ・公的資金は主に基礎・基盤研究	3層 (システム、イネーブラー、要素技術) のコンカレント型 ・例: ERC, フランウンホーファ, パロアルト研究所 ・オープンな研究ネットワーク、研究受託ネットワークで環境変化の情報を機敏に探 索 ・需要表現のスピードが向上
⑪ 働き方、社会 人教育などの考 え方 (education system of work-ing people, etc.)	終身雇用 ・労働時間契約 ・企業が社員教育に投資	クラウドワーカー (デジタル空間での高付加価値業務) というフリーランス (アウト プット契約、複数契約可) を推進、生産性の向上を図る ・社会人の継続的な学習は、公的に支援。 ・個人の学習履歴の公的把握と提供の仕組が重要 ・仲介マージンを拡大させないために、クラウドソーシング (仲介) 機関の評価が重 要 (IGメタルが既に実施)

謝辞: 本稿への貴重な機会をいただいた木村英紀先生へ感謝したい。本稿は、株式会社野村総合研究所、システムイノベーションセンター、ロボット革命イニシアティブ協議会、慶應義塾大学大学院システムデザインマネジメント研究科などでの議論が基礎となっている。関連する方々に併せて感謝致したい。

参考文献

- [1] 横断型基幹科学技術研究団体連合 第4次産業革命とシステム化委員会(木村英紀主査), 平成28年度「製造基盤技術実態等調査(第4次産業革命における「知」のシステム化対応の実態調査)報告書」(2016).
<https://www.trafst.jp/IRsys.html>
- [2] M. ポーター: ポーター教授の最新経営論, No. 2023 日経ビジネス, 2020.01.06 (2020).
- [3] Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0 Final report of the Industrie 4.0 Working Group, acatech National academy of science and engineering, April (2013) (日本語翻訳版) https://www.nri.com/jp/knowledge/seminar/1st/2017/iis/0531_01_2
- [4] Morris A. Cohen, Seungjin Whang: Competing in Product and Service: A Product Life-Cycle Model, Vol. 43, Issue 4, April (1997).
- [5] Oliver E. Williamson: The Economics of Organization: The Transaction Cost Approach, American Journal of Sociology, Vol.87, No.3, pp. 548-577 (1981).
- [6] キム・クラーク, カーリス・ボールドウィン(著), 安藤晴彦(翻訳): デザイン・ルール モジュール化パワー, 東洋経済新報社(2004).
- [7] ヘンリー チェスブロウ, ウィム ヴァンハーベク, ジョエル ウェスト(著), PRTM(監訳): オープンイノベーション, 英治出版(2008).
- [8] ヘンリー チェスブロウ(著), 博報堂大学(監訳): オープン・サービスイノベーション, 阪急コミュニケーションズ(2012).
- [9] 新宅純二郎, 江藤 学: コンセンサス標準戦略, 日本経済新聞出版社, 東京(2008).
- [10] D. J. ティース(著), 菊澤研宗(翻訳): ダイナミック・ケイパビリティの企業理論, 中央経済社(2019).
- [11] Boris Otto, White paper INDUSTRIAL DATA SPACE DIGITAL SOVEREIGNTY OVER DATA, Fraunhofer Institute for Material Flow and Logistics IML Fraunhofer-Gesellschaft, München (2016),
<https://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/en/fields-of-research/industrial-data-space/whitepaper-industrial-data-space-eng.pdf>
- [12] The FIWARE Community <https://www.fiware.org/>
- [13] C. Wagner et al.: The role of the Industry 4.0 asset administration shell and the digital twin during the life cycle of a plant, 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Limassol, pp. 1-8 (2017).
- [14] 藤野直明, 姫野桂一: サプライチェーン・マネジメントに関するビジネスモデル: 分析と設計理論の考察, 経営情報学会誌, Vol. 10, No. 3, pp. 3-20 (2001).
- [15] TF Wallace, RA Stahl: Master Scheduling in the 21st Century: For Simplicity, Speed, and Success-Up .and Down the Supply Chain, TF Wallace Company (2003).
- [16] Research Council of the Plattform Industrie 4.0 /acatech. Key themes of Industrie 4.0. Research and development needs for successful implementation of Industrie 4.0 (2019).
- [17] Fumio Kodama: Emerging patterns of innovation : sources of Japan's technological edge, Harvard Business School Press (1995).
- [18] White Paper on Work 4.0 by the Federal Ministry of Labor and Social Affairs of Germany (2017).
- [19] James N. Martin: The Seven Samurai of Systems Engineering: Dealing with the Complexity of 7 Interrelated Systems, The INCOSE Proceedings, international Council on Systems Engineering (2014).

藤野 直明



1962年生。1986年早稲田大学理工学部物理学科卒業。同年株式会社野村総合研究所入社。現在株式会社野村総合研究所主席研究員。1998年東京大学大学院工学系研究科博士課程、先端学際工学専攻単位取得。早稲田大学大学院情報生産システム研究科客員教授。日本オペレーションズ・リサーチ学会フェロー。オペレーションズ・マネジメント&ストラテジー学会理事。日本経営工学会副会長。一般社団法人システムイノベーションセンター実行委員会委員。JR東日本モビリティ変革推進フォーラムステアリング委員会委員。ロボット革命イニシアティブ協議会製造 IOT 情報マーケティングチームリーダー。日本小売業協会 CIO 研究会 ステアリングコミティ コーディネーター。日本ロジスティクスシステム協会 戦略 SCM コース 講師。(著書) サプライチェーン経営入門(日経文庫)。(共著) 小説 第4次産業革命。(監訳)「金融は人類に何をもたらしたのか」(フランクリンアレン 著, 東洋経済新報社, 2014)。(監訳)「インメモリ革命」(ハッソブラットナー 著, 三恵社)。