

2022年3月発行

九州産業大学「エコノミクス」第26巻第2号 別刷

サイバーフィジカルシステム (CPS) がもたらす 製造業の変革

砂 口 洋 毅

サイバーフィジカルシステム (CPS) がもたらす 製造業の変革

砂口 洋毅

キーワード：サービタイゼーション，プリエンプティブ・サービス，
知識を基盤とする規模の経済

1. 背景

現在、情報通信技術 (ICT) を基盤としたさまざまな技術が日々進化を続けている。その結果、さまざまなデータを取得するセンサーの開発、実装を目指すトリリオンセンサー (Trillion Sensors)、あらゆるものがネットワークに繋がる IoT (Internet of Things) が社会実装に向けて着実に進行している。これらを活用して実現するのがサイバーフィジカルシステム (CPS) であり、現在われわれが直面している第四次産業革命の中核として、さまざまな分野の産業競争力の優劣を決定する大きな要因となろうとしている。もちろん、製造業も例外ではない。多くの企業が CPS を活用することによる競争優位の確立を目指し、さまざまな取り組みを開始している。

CPS を活用した製造業の変革には、製造効率を著しく改善することを目的としたものや、異分野・異業種のデータを活用することによる、あたらしい付加価値の創出を目的としたものなどがある。たとえば、Porter and Heppelmann (2014) は、製品が備える Smart Connected 機能により、仮想空間

に蓄積されたデータが事業領域を超えて結びつき、活用されることによってイノベーションが創出され、あたらしい経済価値を生み出すと示唆している。これら、仮想空間を活用する CPS の実装によってもたらされる製造業の事業構造転換のひとつとして、製造業のサービス化（サービタイゼーション）があげられる。

サービタイゼーションとは、製造事業者が自身の製造する製品をサービスの構成要素のひとつとして組み込み、顧客にサービスを提供する仕組みである。製品が取得するフィールドデータを仮想空間に収集・蓄積し、それらを分析することによってあたらしいサービスを提供しようとするものである。サービタイゼーションを志向する製造事業者は、サービス部門を新設するとともに、既存の製造部門との連携を図らなければならない。つまり、組織変革という観点からは、製造事業者は既存の製造部門を維持しつつ、新設されるサービス部門とデータを軸に連携するというダイナミックな組織変革が求められるのである。

サービタイゼーション研究は多岐にわたっており、さまざまな研究グループがそれぞれの立脚する視点からの研究に取り組んでいるが、ダイナミックな組織変革という観点からの研究はほとんど見られない (Baines, Ziaee, et al., 2017)。砂口 (2021) は事業活動におけるデータの流れに着目し、サービタイゼーションを志向する製造企業のダイナミックな組織変革のフレームワークとして、「プリエンプティブ・サービス・オペレーションモデル」を提案している。本研究は、同モデルを実際の事業活動に適用することによって、モデルの有効性を検証するとともに、CPS 活用の今後の可能性について検証をおこなうことを目的とする。

2. CPS とは

CPS とは、米国国立科学財団 (NSF) の Dr. Hellen Gill が2006年に提唱した概念である。製造業の競争力が相対的に低下傾向にあった米国にあって、ハードウェアに関する固有技術の進化を追い求めるのではなく、ハードウェアとソフトウェアとを融合することによって、高い競争力を確立・維持しよ

うとする考え方に基づいている。そして、CPSは特定の産業分野に向けられた概念ではなく、ハイ・テクノロジー領域を中心とする産業分野における、共通基礎研究領域として位置付けられたものである。図1に示すCPS Flower (J.Wing, 2008) は、CPSの概念を的確に表現している。

近年、製造業においては複数のプロセスを同時に進行させることによって開発効率を上げるコンカレント・エンジニアリングといわれる手法が取り入れられているが、CPSはコンカレント・エンジニアリングの概念を研究開発にまで拡張したものとみなすことができる。基礎研究から応用研究まで、産官学がそれぞれの役割で並行して取り組むという考え方である。

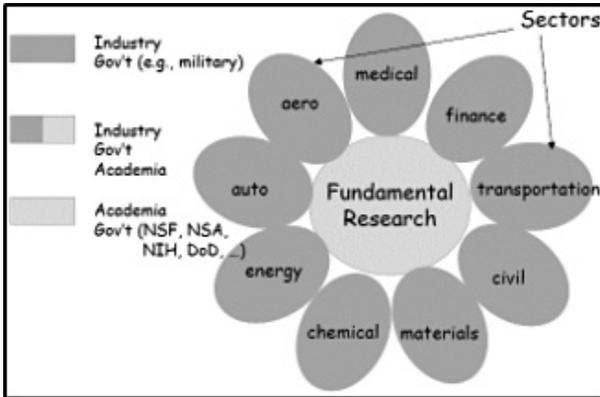


図1 CPS Flower

CPSは概念としての存在であり、CPSに関わる人々が立脚する視座の違いにより、その解釈も多様である。CPSを、その起点となるソフトウェア工学の観点に立って解釈すれば、「CPSはコンピューティング技術によるサイバネティクスの具体化であり、フィードバックの考え方とコンピューティング科学の融合である (中島, 2015)」と考えることができる。

CPSは米国の産業政策と強く結びつき、米国の技術戦略において重要性の高い概念として今日に至っている。その一方で、CPSの概念はいち早く欧州に伝播し、その後には世界各国へと拡大している。ドイツでは、「Smart Society」と称するCPSに基づく産業政策を立案し、その中でも製造業にお

ける CPS 活用を「Industrie 4.0」として、ドイツの産業競争力を将来にわたって維持するための重要施策として位置付けている。

日本においても、CPS/IoT 社会の実現に向けた取り組みとして内閣府が「Society 5.0」を公開しており、産業構造をはじめとしたさまざまな社会活動の変化の方向性を示している。

3. CPS による全体最適の実現

前述するように、CPS は概念として提示されたものであり、具体的なスコープやモデルは実装するものの立脚する立場によってさまざまである。しかし、CPS を実装する目的が個別最適ではなく全体最適を目的とすることは共通である。図 2 に示すように、既存の多くの機械システムは駆動系と制御系を内部に有しており、これらの系は閉じたループを形成している。制御系は駆動系をモニタリングし、コントロールすることによって、さまざまな環境下で機械システムが最善のパフォーマンスを発揮することを可能にする。

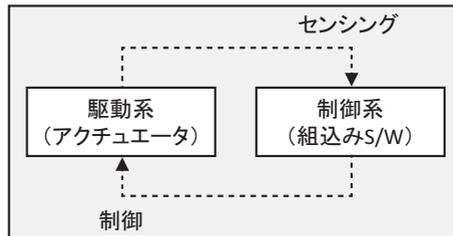


図 2 既存の機械システムにおける個別最適制御

Beyond 5G が実装された社会では、伝送による遅延が 1 ms 以下となるため、制御系と駆動系が物理的に離れた場所にあっても、機械システムの動作に不具合が生じることはない。たとえば、遠隔手術に用いられるシステムは、物理的に離れた場所にいる医者が患者の状態をリアルタイムにモニタリングし、さまざまな医療器具を遠隔操作することによって実現するものである。

図 3 に示すように、さまざまな機械システムの制御系を集約して管理することにより、これらの機械システム全体として発揮するパフォーマンスを最

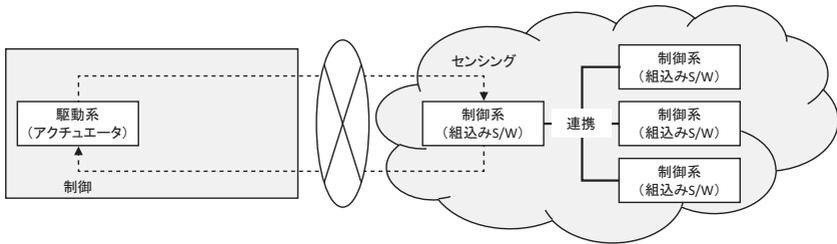


図3 CPSを活用する全体最適

大化することが可能となる。つまり、個々の機械システムの集合体として構成される上位のシステムを最適化することが可能となる。言い換えると、CPSは、社会や産業構造を System of Systems としてみなし、全体最適を実現するためのインフラと成り得るのである。

4. CPS の社会実装

前節で述べたように、社会をさまざまなシステムによって構成される集合体 (System of Systems) と考え、全体最適を図る上で、CPSは必要不可欠なインフラとなる。たとえば、2015年の国連サミットで採択されたSDGs (Sustainable Development Goals; 持続可能な開発目標) は、国連に加盟する193カ国に対し、2030年までに達成すべき目標が設定されている。SDGsには17の目標が設定されており、さらに目標ごとに分類された169のターゲットで構成されている。これらの目標やターゲットは相互に影響しあい、現在の技術レベルではトレード・オフの関係にあるものも多く存在する。たとえば、「1. 貧困」「2. 飢餓」「7. エネルギー」といった目標では、経済活動の活性化が必要不可欠とされる一方で、コスト高ではあるが環境負荷の少ない再生可能エネルギーの利用促進を同時に達成しなければならない。しかし、逐次的に個々の社会活動の個別最適を図るだけでは、これらの課題を同時に達成することは困難である。社会を常に変動する全体システムとみなし、全体最適を図りつつ、漸的に目標達成に向かう手段が必要とされる。そのためには、社会を構成するさまざまな活動をモニタリングし、それらの活動のアウトプットを全体最適化するようにシミュレーションした結果をリアル

タイムにフィードバックするといった機能が必要となる。そして、この機能を提供するために実装されるのが CPS である。

CPS が社会実装される前提として、IoT の実現があげられる。現実世界のあらゆるものが固有の ID (IP アドレス) をもち、現実空間のさまざまな活動によって生じるフィールドデータが仮想空間に送信される。仮想空間では、現実世界のさまざまな活動がモデリングされており、現実世界から送信されるデータを基に最適化シミュレーションがリアルタイムに実行され、その結果は CPS として管理される制御系を通して、現実空間へとフィードバックされる。つまり、現実空間のさまざまな事象が仮想空間に数理モデルとして構築され、現実空間の活動によって生じる「as-is モデル」のデータを基に、仮想空間で実行される最適化シミュレーションによって「to-be モデル」を設計し、現実空間に対して最適制御をおこなう機能をもったものが CPS であるといえる。CPS は現実空間と仮想空間との間にフィードバック・ループを形成し、連続的にそのサイクルを回す機能をもったシステムである。

5. 製造業における CPS の活用

近い将来、社会実装されるインフラのひとつとして CPS に関するさまざまな研究・開発が進行しているが、中でも産業分野における CPS 活用が先行している。グローバルな情報化の進行により技術優位を維持できる期間が短縮され、いわゆる中間工程とされる製品の組立や製造だけでは十分な付加価値が得られず、開発コストの回収すらも困難になりつつある。その結果、製造業事業者は付加価値の創出を求め、製品を軸としつつも、バリューチェーンの拡大を目的として上流工程や下流工程に付加価値を求める傾向が年々高まっている。

下流工程にあらたな付加価値を求める製造事業者の潮流として、近年製造業のサービス化 (サービタイゼーション) が注目されている。製品を顧客に販売したのちのサービスに付加価値を求めるサービタイゼーションは、いわゆるアフター・サービスである。Wise and Baumgartner(1999)はアフター・サービスを「組込みサービス」、「包括的サービス」、「統合ソリューション」、

表1 サービスタイゼーション・モデルの分類

大分類	モデル		価値の源泉	提供物	製品所有者	Wise and Baumgartner (1999) による4つのバリエーション拡大戦略
	中分類	レベル				
アフター・サービス	ブレイク&フィックスモデル	ベーシック	修理・部品販売など	製品	顧客	「包括的サービス」 「統合ソリューション」 「ディストリビューション・マネジメント」
	メンテナンスモデル	ミディアム	予防保全など			
プリエンプティブ・サービス		アドバンス	運用管理など	サービス	製品事業者	「組込みサービス」

「ディストリビューション・マネジメント」の4つに分類した。その中でも、製品に組み込まれた機能とサービスが不可分な「組込みサービス」はプリエンプティブ・サービスと呼ばれるものである。以下に示す表1は、サービスタイゼーションと Wise and Baumgartner (1999) の分類の関係を示したものである (砂口, 2021)。

プリエンプティブ・サービスでは、以下のサイクルが継続的に実行される。

1. サービスに組み込まれている製品は、利用されている環境下における周囲の状態や、自身の動作状態などのフィールドデータをモニタリングする。
2. 製品が収集したデータを仮想空間に設置されたサーバに送信する。
3. サーバに蓄積されたデータが分析される。
4. 分析結果を仮想空間から現実空間にフィードバックし、サービスや製品の改良がおこなわれる。

上記のサイクルを継続することにより、データは常に更新しながら蓄積され、データを分析することによってもたらされる知見は有効性・確実性が増し、製品を含むサービス全体の競争力が継続的に高まることが期待できる。

データの蓄積・分析がもたらす競争優位について、Chesbrough (2010) は「知識を基盤とする規模の経済」と名付けた。従来の大量生産・大量消費社会において、製造事業者が競争優位を確立するための基本戦略とされていた「規模の経済」に代わり、データを蓄積し活用することが競争優位をもたらすのである。そのためには、データによって現実空間と仮想空間を連結す

る CPS がインフラとして必要となる。言い換えると、CPS を活用することが「知識を基盤とする規模の経済」の実現をもたらし、当該サービスや企業の競争優位を確立・維持するのである。

6. プリエンプティブ・サービス・オペレーションモデル

製造事業者が既存の製造部門を起点として、製品のスマート機能を活用し、組織を連続的に変化させなければならない。製品の稼働データを基に、製造部門は精度の高い需要予測を実現することができる。これは、データに基づいた精度の高い生産計画を設計することが可能となることを意味しており、部材の購入から製造、出荷までを含めたサプライチェーン全体の効率化を促進する。この効率化はコスト低減に貢献するため、従来以上の開発投資が可能となり、製品の機能や品質の向上が期待できる。

一方、製品の稼働データを基に、新設されるサービス部門はプリエンプティブ・サービスに対する顧客満足度を把握することができ、サービスの改善点

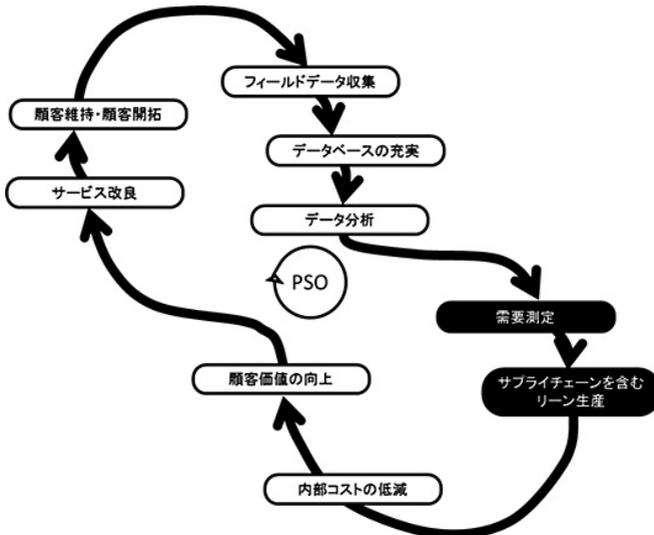


図4 プリエンプティブサービス・オペレーションモデル (PSO)

や追加サービスの必要性を検討する材料とすることができる。また、製品機能の改善や追加により、より顧客満足度の高いサービス開発を検討することが可能となる。

プリエンプティブ・サービスにおいては、サービスと製品は不可分であり、製造部門とサービス部門はデータ活用という観点において、密接にリンクしていなければならない。前述したように、製品のスマート機能を十分に活用するためには、起点となる製造部門のオペレーション変革として、次の2つが必要条件となる。

- (1) 製品のスマート機能を活用し、需要測定を実現する。
- (2) サプライチェーンを含む柔軟なリーン生産体制を実現する。

これら2つの必要条件を満足し、オペレーション変革を実現する一般化モデルを、砂口（2021）は図4に示すようなプリエンプティブサービス・オペレーション・モデル（PSO）として提案している。

7. プリエンプティブ・サービス・オペレーション・モデルを用いた事例検証

本節では、実際の事業にプリエンプティブ・サービス・オペレーションモデルを適用し、その有効性を検証する。対象として、グローバルにビジネスを展開する民間航空機エンジン業界と、ドメスティックにビジネス展開をおこなう集団給食業界の2つの事業を選択する。民間航空機エンジン業界では、プリエンプティブ・サービスモデルの代表的事例として研究の対象となり、さまざまな知見が蓄積されている Rolls-Royce 社の“Power by the hour”を対象とする。集団給食業界では、製造を起点とした独自のサービス・モデルを確立したことによって、長期にわたって高収益を実現している株式会社玉子屋の給食事業を対象とする。

先進技術の活用度や業態が大きく異なるこれら2つの事業を対象として、プリエンプティブ・サービス・オペレーションモデルを適用し、オペレーション変革がもたらす競争優位について分析をおこなうことで、プリエンブ

ティブ・サービス・オペレーションモデルの有用性を検証する。2つの事業について取り上げた論文や書籍，公開されている企業情報や業界情報を基にプリアンプティブ・サービス・オペレーションモデルを適用し，それぞれの競争優位について分析をおこなうことによって，競争優位分析のフレームワークとして適用することの有効性について検証をおこなう。

7.1. 事例1：民間航空機エンジン業界

7.1.1. 業界概要

民間航空機エンジンは，2017年の世界販売総額が1兆2,370億ドル（一般財団法人日本航空機開発協会，2020）にのぼり，巨大な市場規模を誇るとともに，世界的な航空機需要の高まりが牽引する成長産業として期待されている。一般社団法人日本航空宇宙工業会（2020）によれば，民間航空機エンジンの世界市場シェアは，2017年度に General Electric が31.0%，Pratt & Whitney を前身とする United Technologies Corporation が18.3%，Rolls-Royce が15.7%と，3社で65%を占める。

航空機エンジンは航空機を構成する主要要素であり，過酷な使用環境下において高信頼性を維持する必要がある。また，一般に航空機エンジンの製品寿命は20年以上におよび，長期間にわたって性能と品質を維持し続けなければならない。そのため，航空機エンジン市場では，メンテナンスや整備事業，交換部品による交換事業などから構成される巨大なアフターマーケットが形成されている。一般に，航空輸送企業は，交換部品を含む航空機エンジン購入に係る初期費用の数倍をアフターマーケットで負担する。

7.1.2. Rolls-Royce のビジネスモデル

民間航空機エンジン業界において，Rolls-Royce は巨大企業の一角としてその地位を維持し続けている。しかし，そのビジネスモデルは時代とともに変化している。従来は航空機エンジンのラインナップを拡充し，あらゆるタイプの航空機にエンジンを供給できるようにして規模の経済を追求するのが基本的なビジネス戦略であった。しかし，現在は TotalCare[®] というパフォーマンスベース契約を基盤とするモデルが中心となっている。

民間航空機エンジン業界では、技術進化による航空機エンジンの急速な高出力化により、パイロットにはそれまで以上の繊細なコントロールが求められるようになった。微妙なコントロールのためにはリアルタイムにエンジンの状況を把握する必要があるため、多種多様なセンサーがエンジンに設置され、エンジンの稼働状況はリアルタイムに、かつ精緻にセンシングされるようになった。一方で、技術の進化は航空機エンジンの高品質化をもたらし、耐久性が向上した。その結果、メンテナンスとしての部品交換回数が減り、それまで Rolls-Royce の主要な収益源であった交換部品事業を圧迫することになった。そこで、Rolls-Royce は、設置されたセンサーを活用することによって、ベーシックなサービスである交換部品販売から、航空機エンジンの予兆保全とアウトカム契約といったより上位の TotalCare[®]へと移行していったのである。このようなビジネスモデルの変化によって、Rolls-Royce のサービス事業が総収益に占める割合は1991年には25%にとどまっていたが、2011年には60.2億ポンドと総収益112.8億ポンドの53.4%を占めるまでに増加している (Smith, 2013)。

7.1.3. Rolls-Royce のオペレーション分析

TotalCare[®]を実現するために、Rolls-Royce は顧客に提供している航空機エンジンの稼働状況を24時間監視するためのオペレーションセンターを稼働させている。世界中で稼働しているエンジンの状況をリアルタイムにモニターし、稼働中のエンジンに出力の異変などが検知されると、該当機が着陸するまでに速やかに交換部品の交換や修理ができる体制を整えるように指示する機能をもったセンターである。このセンターの活動によって、Rolls-Royce は顧客に提供したエンジンのダウンタイムを最小化し、エンジン稼働率を向上させることに成功している。

Rolls-Royce が提供する TotalCare[®]にプリエンプティブ・サービス・オペレーションモデルを適用し、Rolls-Royce が実現したオペレーションモデル (PSO (R)) を図5に示す。以下、図5を用いて TotalCare[®]の競争優位について分析する。

オペレーションセンターには世界中で稼働しているエンジンのデータが集

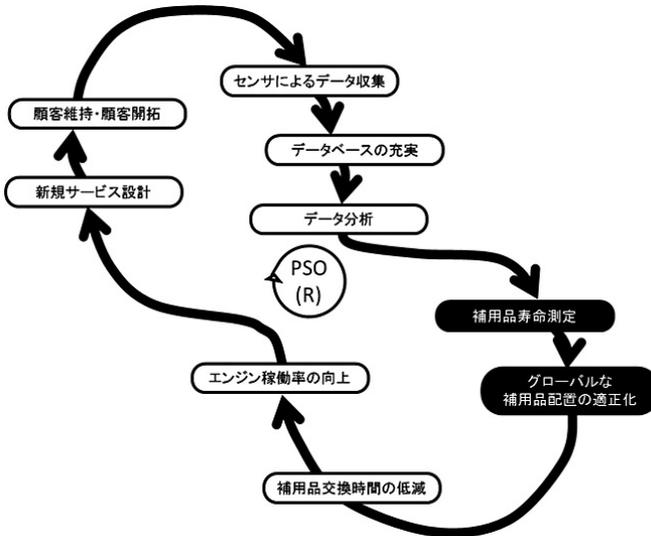


図5 プリエンプティブ・サービス・オペレーションモデルによる
Rolls-Royce のオペレーションモデル (PSO (R))

められ、蓄積される。エンジンに関するあらゆるデータがオペレーションセンターに集積され、予兆保全や故障対策に関する情報が蓄積されていくにつれて、TotalCare[®]のグローバル・コントロールセンターとしてオペレーションセンターが果たす機能の重要性は増し、機能価値は向上する。データの蓄積が進むにつれて交換部品の寿命予測の精度は向上し、寿命測定を実現する。需要予測から需要測定へと進捗することによって、交換部品の提供や修理、メンテナンスの計画精度は向上する。そして、これらのサービスを提供するためには、交換部品や在庫部品、メンテナンスに必要なツールなどをグローバルに配置しなければならない。そのために Rolls-Royce がおこなったのがインフラ構築であり、MRO (Maintenance, Repair and Operation) サービスをグローバルに提供するために、世界中の主要拠点に施設を設けた (Smith, 2013)。2004年、Rolls-Royce は顧客である航空会社のエンジンを24時間監視することができるオペレーションセンターを Derby 本社に開設し、3,500基以上のエンジンの稼働状況をモニタリングしている (Rolls-Royce: Annual Report Archive)。この MRO インフラは、オペレーションセンター

に集約されたエンジン稼働に関するデータの蓄積を基に、交換部品などの在庫配置をグローバルなレベルで最適化することによってコストを最小限に抑えるとともに、交換部品の提供やメンテナンスサービスを顧客に提供するリードタイムを最小化し、エンジンのダウンタイムを削減して稼働率を向上させることに成功した。Rolls-Royce はオペレーションセンターに集約・蓄積されたデータを分析することによって故障予知精度を高め、MROに必要な補修部品の製造と配置を最適化したのである。

エンジン稼働率の向上が顧客価値を上げ、TotalCare®の有効性を実証したことによって、既存のブレイク&フィックス・モデルをベースとした契約から、TotalCare®へ移行する顧客は増加した。一般に、航空機エンジンの交換部品事業はエンジンを提供した数年後から始まるため、それまでは売り上げが見込めない。一方で、TotalCare®はエンジン提供とともに売上が発生し、航空機エンジン事業の収益性と安定性に貢献する。

事業の収益性と安定性の向上によって、従来は他社に委託していたさまざまな作業を自社内に取り込むことが可能になった。これにより、TotalCare®がカバーするサービスメニューはより充実し、オペレーションセンターの機能価値はさらに向上した。

蓄積されたデータ量が豊富になり、サービスメニューが充実することによって、本来は顧客がおこなう作業を代替するあたらしいサービスの提供が可能になる。たとえば、エンジンのパフォーマンスと燃料消費量、天候や風速に関する外部情報などを総合的に分析することによって可能となる運航マネジメントサービスなどである。航空機エンジンのMROサービスという領域を越えて、顧客の事業価値を向上させるサービスを提供することによって、カスタマー・リレーションシップはより強固なものとなり、既存顧客はRolls-Royceの製品とサービスにロックインされる。また、あたらしいサービスはあらたな顧客開拓へとつながっていく。そして、既存顧客との契約継続や新規顧客開拓によって、オペレーションセンターに集積されるデータはますます豊富になり、さまざまな分析精度は向上する。

このように、交換部品の寿命予測から寿命測定への転換と、サプライチェーンを中心としたリーン生産体制の確立によって、Rolls-Royceは「知識を基

盤とする規模の経済」を活用できるオペレーション体制を構築し、TotalCare[®]の競争優位を実現することができたのである。

民間航空機エンジン業界では、Rolls-Royceのみならず、業界1位のGeneral Electricや、同2位のUnited Technologies Corporationも、MROサービスを越えてTotalCare[®]と同様のサービスを提供しており、同業界における標準ビジネスモデルといっても過言ではないほどに普及している。このことは、Rolls-Royceのオペレーション変革による競争優位が、同業界内で認められていることを示している。

7.2. 事例2：集団給食業界

7.2.1. 業界概要

外食産業の集団給食（弁当給食）業界は、いわゆる仕出し弁当を主要事業とする。以下、一般社団法人日本フードサービス協会(2018)によれば、2017年度の当該分野の市場規模は5,425億円である。配送地域の制約などから事業領域は限定されており、地域ごとに一定の棲み分けがされている。一方で、材料原価率は30%程度であり、製品（弁当）の差別化は容易ではなく、同業間で熾烈な価格競争が展開されている。また、ファーストフード業界など、外食産業の他分野の事業者との競争も激しい。その結果、同業界の平均利益率は0.7%とかなり低いレベルにある。そのような状況にある中で、株式会社玉子屋（以下、玉子屋）は、業界平均の8倍ほどに相当する5%から6%の売上高経常利益率を継続的に維持している（菅原、2002）。

7.2.2. 玉子屋のビジネスモデル

玉子屋は、東京23区と川崎、横浜地区（いずれも一部地域を除く）で、給食施設をもたない企業と法人契約を結び、従業員に弁当を提供するB2B2Cビジネスを展開している。玉子屋のウェブサイトによれば、1日平均およそ62,000食の弁当給食を提供しており、2017年度の売上はおよそ90億円であり、集団給食業界においては最大手企業のひとつであるが、市場シェアは1.7%程度である。

玉子屋のメニューは1種類のみで日替わりとなっており、2週間ごとに契

約企業にメニュー表が届けられる。弁当は主食である米とおよそ7種類の副食で構成され、カロリーと栄養バランスが考慮されている。契約企業の従業員からの当日注文を10時まで受け付けており、玉子屋の配達担当者によって注文された個数の弁当が12時までに契約企業のオフィスに配達される。配達担当者は再び午後になって契約企業のオフィスを訪問し、弁当の空容器を回収する。回収された容器は洗浄され、翌日以降の弁当に再利用される。料金体系は月額などの固定制ではなく、契約企業の従業員が注文するごとに都度支払いをおこなう従量制となっている。

玉子屋は、契約した事業所に代わり、弁当という形式で従業員に適切な栄養分とカロリーを給食するだけではなく、容器やゴミの回収、課金といった、給食施設に必要な作業すべてを事業所に代わって提供することで対価を得ている。玉子屋が弁当を提供するのは、不特定の消費者ではなく、玉子屋と契約した事業所に所属する従業員だけであり、給食というサービスを事業所に提供するサービスプロバイダーとして位置付けられる。

玉子屋は、給食サービスのクオリティを継続的に向上させるため、日々、製品（弁当）の提供を通じて、さまざまな顧客に関する情報を収集している。ただし、製品に認知機能や接続性といったインテリジェンスをもたせることが困難なため、これらの情報を直接に収集することは実現されていない。そのため、配達および回収を担当する従業員がセンサーの代わりとなり、食べ残し状況のチェックや配送・回収時の従業員との会話、事業所の様子など、製品の顧客満足度を含めた契約企業に関するさまざまな情報を認知し、本部に集約するというヒューリスティックな手法を活用している。製品（弁当）から得られるフィールドデータ（顧客の嗜好など）を活用し、継続的にサービスの競争力を維持、改良するプロセスとして実践しているのである。

最近では、玉子屋は彼らが構築した給食ネットワークを活用し、サンプリング調査というマーケティングサービスを提供している。これは、試作品などのサンプルを玉子屋が契約する事業所の従業員に弁当とともに配布し、アンケートなどを回収するというサービスである。

玉子屋は、毎日60,000食以上の給食用弁当を製造するという製造業としての側面と、契約企業に代わって従業員に給食を提供するというサービス業と

しての側面の2つをもっている。そして、製品である弁当を軸に、製品や顧客に関するさまざまなデータを収集することによって、サービスとしての価値を向上させ、高い顧客満足度を維持しているのである。このように、玉子屋のビジネスモデルは、Wise and Baumgartner (1999) が4つに分類したサービタイゼーション・モデルのひとつである「組込みサービス」とみなすことができる。

7.2.3. 玉子屋のオペレーション分析

当日注文を10時に締切り、12時までに約62,000食の弁当を契約先企業のオフィスに配達するためには、10時になって予約数が確定する前に見込み生産を開始する必要がある。そして、予約数量が確定してから配達するまでの時間で、見込み生産数量との差分を埋めるための追加生産をおこなう。後から生産された弁当は、配達担当の従業員が連絡を取り合い、必要個数を融通し合う中継方式の配達に組み込まれ、所定の時間までに各所の契約企業のオフィスに届けられる。このようなサプライチェーン（配達）を含めた柔軟なリーン生産を可能にしたのが、確度の高い見込み生産数量の決定と1日1品目のメニュー設定、積極的な機械設備の導入、柔軟な配達体制である（根来, 2014）。

玉子屋のビジネスにプリエンプティブ・サービス・オペレーションモデルを適用し、玉子屋が実現したオペレーションモデル（PSO (T)）を図6に示す。以下、図6を用いて玉子屋の競争優位について分析する。

まず、契約企業に弁当の配達・回収をおこなう配達担当者による日々のデータ収集とその蓄積によって、需要測定を実現した。配達担当者は、その企業のイベント（顧客情報）や、食べ残された食材（製品状況）についての情報を収集する。これらの情報はすべて玉子屋本部に集約され、蓄積される。玉子屋の製品は弁当であり、現状では製品自体にスマート機能をもたせることは難しい。しかし、配達・回収をおこなう従業員が情報を収集し、本部に伝達するというスマート機能を代行しているのである（今後の技術開発によっては、容器にスマート機能をもたせることが可能になるかもしれない）。蓄積されるデータが増えるにしたがい、当日の見込み生産数量の確度は上が

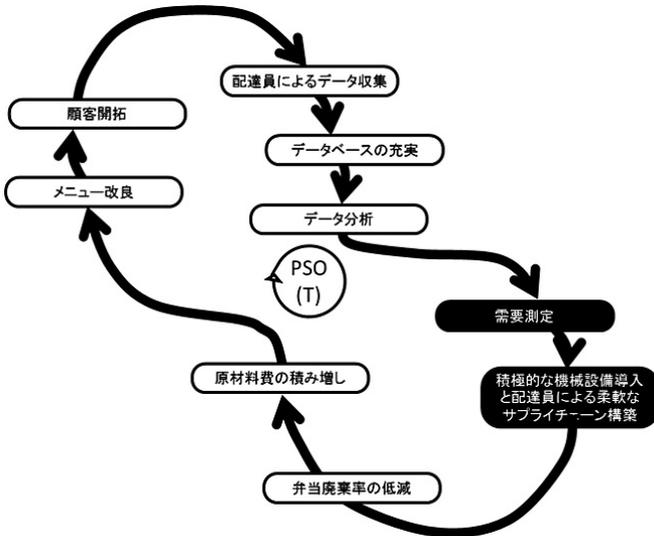


図6 プリエンプティブ・サービス・オペレーションモデルによる
玉子屋のオペレーションモデル (PSO (T))

る。

需要測定が可能になったことによって、材料の仕入れから調理までのプロセスが最適化され、効率化が進む。弁当の品目をひとつに絞り、機械設備を積極的に導入することによって、設備の稼働率が上がり、生産効率が向上して短時間での製造が可能になる。生産効率の向上は、過去のデータからは導き出せないような突発的なイベントなどによる注文数の増減にも対応を可能にした。さらに、配達を担当する従業員同士が連絡をとりあって構築するヒューリスティックな配達ネットワークは、柔軟なサプライチェーンを構築し、生産計画の自由度を上げる。これらのケイパビリティが連携することによって、限られた時間内に必要十分なだけの弁当を製造し、提供することを可能にしたのである。

このように、需要測定と、サプライチェーンを含むリーン生産体制を併せもつことによってもたらされるのが、同業他社に比べて極端に低い製品廃棄率である。玉子屋は0.1%未満という低い廃棄率を達成しており、これは業界平均の1/20という驚異的な低さである(菅原, 2002)。一般に、弁当は

長期保存ができず、保存期間に反比例して急速に商品価値を失う。在庫となった弁当のほぼすべてが廃棄され、売上や利益に貢献することはない。廃棄率の低さは生産に関する余剰コストを大きく削減する。その結果、投資可能な資金枠が拡大し、原材料費の積み増しや、より生産効率の高い新規設備の導入が可能となる。実際に、同業他社の材料原価率が30%程度であるのに対し、玉子屋の材料原価率はおよそ50%と高くなっている（菅原，2002）。

原材料費を増やす余裕が生じることによって、メニューを設計する際の食材選択肢は増える。それは、より高品質な食材の利用を可能にすることによって弁当の品質を向上させたり、メニュー設計の自由度を拡大したりする。その結果、顧客満足度は向上し、既存企業との契約は長期にわたって継続されるとともに、あたらしい顧客の開拓を可能にする。顧客を一定数以上に維持することによって、日々あたらしいデータが蓄積されて、データベースはより充実したものへと成長する。そして、需要測定の精度は向上する。

このように、玉子屋は、日々増え続けるデータを基に需要測定の精度を上げるとともに、効率の高い製造設備と柔軟なサプライチェーンが、さまざまな要因による需要変動への対応を可能にしたことで、「知識を基盤とする規模の経済」を活用できるオペレーション体制を構築し、競争優位を実現することができたのである。

ほとんどの同業他社は、需要測定とリーン生産の2つの特徴をもったオペレーションに向けた改革を実現していない。それが、玉子屋の約1/8という低い平均利益率となってあらわれており、玉子屋の競争優位が長期間にわたり維持されているのである。

8. 考察

前節では、先進技術の活用度や業態が大きく異なる2つの事例にプリエンティブ・サービス・オペレーションモデルを適用することによって、それぞれの競争優位について分析をおこなった。その結果、いずれも（1）製品のスマート機能を活用し、需要測定を実現する、（2）サプライチェーンを含む柔軟なリーン生産体制を実現する、という2つの目標を同時に達成して

いることが検証された。これら2つの目標は、それぞれ個別に実現しても事業改善効果があることは一般に認められていることである。しかし、プリアンプティブ・サービスにおいては、これら2つの目標を同時に達成することによって、知識の規模の経済がドライビング・フォースとなり、プリアンプティブ・サービス・オペレーションモデルが示すループを継続的に循環させることによって、競争優位を確立・維持できるのである。たとえば、Rolls-Royce の場合、グローバルビジネスとして適切な補用品配置をおこなうために確度の高い補用品の寿命予測が必要であり、確度の高い補用品の寿命予測のためには適切な補用品配置によるエンジンの稼働率の向上・維持によるデータ収集および蓄積が必要である。玉子屋の場合も同様に、限られた時間内に必要な数量の弁当を効率よく製造して契約事業者に届けるためには、配達担当者が日々収集するデータの蓄積が必要であり、データを蓄積するためには、適切な数量の弁当を限られた時間内に製造して契約事業者に届ける配送ネットワークの整備が必要とされるのである。

製品のスマート機能を実現するIoT関連技術は、製品にさまざまな機能を付加し、製品の高機能化を促進することによって、サービタイゼーションの競争優位を支える。一方で、本研究が提案するプリアンプティブ・サービス・オペレーションモデルは、IoT関連技術を製品生産の歩留まりや稼働率の改善を目的として活用することが、サービタイゼーション戦略として有効であることを示している。これは、サービタイゼーションを志向する製造事業者にとって、ひとつの指針を与えるものである。

9. 結論

本論文では、サービタイゼーションの中のプリアンプティブ・サービスと呼ばれるモデルを対象に、(1)従来の需要予測から製品のスマート機能を活用した高精度な需要測定への転換、(2)ダイナミックな外部環境の変化に柔軟に対応できるサプライチェーンを含むリーン生産体制の構築、の2点を生産部門の変革における特徴とする、プリアンプティブ・サービス・オペレーションモデルを実際の事例に適用することによって、オペレーションの

フレームワークとしての有効性検証をおこなった。

民間航空機エンジン産業と集団給食産業における事例にプリエンプティブ・サービス・オペレーションモデルを適用し、生産部門の変革という視点から、それぞれの事例が実現した競争優位についての分析をおこない、サービタイゼーションを志向する製造事業者のオペレーションを分析するモデルとして、プリエンプティブ・サービス・オペレーションモデルが有効であることを確認した。

製造事業者にとって、サービタイゼーションは比較的にあたらしい概念であり、事例が豊富に存在しているわけではない。本研究で取り上げた事例も2つであり、今後はさらに多くの事例について検証することが望ましい。それによって、本研究が示した生産部門の変革における2つの特徴をより精緻化することが可能であり、製造事業者がサービタイゼーション戦略を設計する上で、オペレーション変革のためのフレームワークとしてプリエンプティブ・サービス・オペレーションモデルを活用することが期待できる。

一方、プリエンプティブ・サービス自体が発展の途上にあり、「知識を基盤とする規模の経済」による競争優位を実現しようとする、さまざまなビジネスモデルが出現することが予想される。製品のスマート機能を活用し、製品のフィールドデータを分析することによって得られる知見を基に、ビジネスを継続的に改良していくフィードバック・ループを構築するために、CPSは必要不可欠なインフラである。製造事業者が第四次産業革命を経て競争優位を確立するためには、CPSに関する理解を深め、実装することが強く求められる。

参考文献

- Baines, Tim., Bigdeli, Ali Ziaee., Bustinza, Oscar F., Guang Shi, Victor., Baldwin, James., Ridgway, Keith. (2017), "Servitization: revisiting the state-of-the-art and research priorities", *International Journal of Operations and Production Management*, 37(2), pp.256-278.
- Chesbrough, Henry. (2010), *Open Services Innovation: Rethinking Your Business to Grow and Compete in a New Era*, Jossey-Bass. (博報堂大学 ヒューマンセンタード・オープンイノベーションラボ (2012) 『オープン・サービス・イノベーション 生活者視

- 点から、成長と競争力のあるビジネスを創造する』、CCC メディアハウス。)
- J. M. Wing (2009), Cyber-Physical Systems, *Computing Research News*, 21(1), 4
- Porter, Michael E. and Heppelmann, James E. (2014), "How Smart, Connected Products Are Transforming Competition", *Harvard Business Review*, Nov, pp.1-23.
- Smith, David J. (2013), "Power-by-the-hour: The role of technology in reshaping business strategy at Rolls-Royce", *Technology Analysis and Strategic Management*, 25(8), pp.987-1007.
- Wise, Richard. and Baumgartner, Peter. (1999), "Go downstream: the new profit imperative in manufacturing", *Harvard Business Review*, Vol.77, pp.133-141.
- 菅原勇継 (2002), 『コロンブスの玉子屋—日本一の弁当屋の華麗なる経営哲学』 文春ネスコ。
- 砂口洋毅 (2021), 「アフターコロナにおける製造業のサービタイゼーション戦略設計」、『アフターコロナに向けた特別推進研究～九産大、メソッド提案課題研究成果報告書～』, pp. 14-25.
- 中島震 (2018) 「CPS のソフトウェア工学：ソフトウェアは対象か手段か」, ウィンターワークショップ2015・イン・宜野湾
- 根来龍之 (2014), 『事業創造のロジック』 日経 BP 社。
- "Rolls-Royce; Annual Report Archive" <<https://www.rolls-royce.com/investors/annual-report-archive/annual-reports.aspx>>2021年12月10日アクセス。
- 「株式会社玉子屋」 <<http://www.tamagoya.co.jp/company/>>2021年12月10日アクセス。
- 一般社団法人日本フードサービス協会 (2018), 「平成29年外食産業市場規模推計について」, <<http://anan-zaidan.or.jp/data/2018-1-1.pdf>>2021年12月10日アクセス。
- 一般社団法人日本航空宇宙工業会 (2020), 「航空宇宙産業データベース」 <https://www.sjac.or.jp/common/pdf/toukei/7_database_2021.08.pdf>2021年12月10日アクセス。
- 一般財団法人日本航空機開発協会 (2020), 「民間航空機に関する市場予測 2020-2039」 <http://www.jadc.jp/files/topics/157_ext_01_0.pdf>2020年12月10日アクセス。