

WP02: 現場学のためのシステム理論

新たな産業革命の流れが、にわかに、そして確実に進行している。新たな革命の主役者は、デジタル化を背景とした情報技術とネットワーク技術である。別の言い方をすれば、これまでのモノ（ハードウェア）を中心とした世界から、それらをつなぐソフトウェア中心の世界への大胆な移行である。ドイツ政府が提唱しているインダストリー4.0、北米の企業が中心となって始めたインダストリアル・インターネット・コンソーシアム (IIC) など、世界中で起きている数々のイニシアティブは、このように考えるとすべて説明できる。

こうした新たな産業革命のもう一つのキーワードは、サービスである。バリューチェーンの最終的な出口は常にサービスであり、製品はあくまでそうした価値を提供するための手段でしかない。顧客にとっての最終的な価値を左右するサービスが、デジタル化された情報技術やネットワーク技術によって、より効率的に提供可能となるばかりか、これまでにない新たなサービスが、新たなつながる世界の出現により、次々と生まれる環境が整いつつあるのである。

このホワイトペーパーでは、これから本格的にはじまる新たな産業革命について、背景にある重要な視点である「システム論」について、その基本となる考え方を整理する。昨今、サイバー・フィジカル・システム (CPS) といった概念や、システム・オブ・システムズ (SOS) といったキーワードなど、システムという言葉が氾濫している。このホワイトペーパーは、それらを、システム思考によって、正しく理解するための基礎を提供する。

新しい時代のイネーブラーは、情報技術とネットワーク技術、そしてそれを統合するソフトウェア工学であるが、それを現実世界に実装するためのキーとなるのは、現場学である。現場学は、個々の人がもつ知恵やノウハウや創意工夫の能力を、実際の場所で、生み出し、発揮し、再構成するしぐみに注目し、いかにしてそれを効率的、効果的に行うかを議論する。本稿では、従来のシステム理論に、新たにこの現場学の視点を加えたフレームワークを提供する。

現場主義とシステム思考

現場主義とは、現地、現物、現実をあらゆる理論や思考結果よりも優先させる考え方、および行動様式である。さまざまなアイデアやさまざまな疑問は、現場によって解決する。解決すべき課題に必要な論理や法則が正しいかどうかをはるかに超えて、その背景となる価値観や論理体系の前提から問い直すことを許容するのが現場である。先輩社員からの OJT も含めて、優秀な技術者は、現場から多くを学び、現場に育てられるといわれる。

一方、物理的（フィジカル）な世界と、情報技術とネットワーク技術によってデジタル空間上に構築されたサイバーな世界とを、IoT（モノのインターネット）技術によってダイレクトにつなげ、データを介して相互に連動するサイバー・フィジカル・システム（CPS）には、こうした現場中心の概念は希薄である。むしろ、人中心、現場中心の概念を排除した世界が CPS であるという見方もできるが、もしそうだとしたら、それは明らかに、ものづくりの一面しか見ていない。なぜなら、自動化され、無人化された生産ラインも、それを作るのは設計や生産技術の現場で働く人であり、それが壊れたときに直すのも生産の現場で働く人だからである。

工場の中で実際に製品や部品を生産する現場に限らず、設計の現場、販売やサービスの現場、そして経営の現場に至るまで、現場といえる場所は数多い。現場とは、生きた（活かした）情報がある場所である。ここで、生きた情報とは、その場で生まれ、その場で形を変え、その場で活用される情報を指す。また、現場とは、物理的あるいは制度的に存在するさまざまな現実と、こうありたいと願う要求とがぶつかり合う場であるともいえる。情報が現場で生まれ、その形を変え、そして活用されるのは、こうした要求を具体化し行動に移そうとする現場で働く人が存在するからである。いいかえれば、それぞれの現場では、要求を表現するために情報を用い、そして現実を知るために情報を用いる。

現場は、さまざまな情報の交差点であるといえる。製造業には、資材を購入し、それを原材料として生産し、出来上がった製品を販売するというサプライチェーンの軸、設備を購入し製品の仕様に対応した生産プロセスを構築し設備をメンテナンスするエンジニアリングチェーンの軸、そして、生産ラインの装置や物理的なモノコトから得られた情報が経営的意思決定につながるマネジメントチェーンの軸の3つの情報の流れがある。図1に示すように、それらは現場で交差しているともいえる。つまり、ものづくりの現場では、サプライチェーン、エンジニアリングチェーン、そしてマネジメントチェーンが集まっており、それらが相互に干渉しあうことで生きた情報が飛び交うことになる。

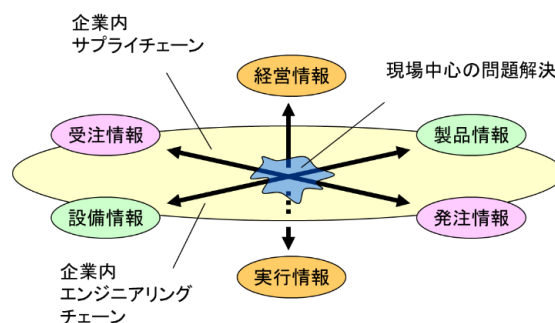


図1 企業内での情報の交差点としての現場

フィジカル、アクチャル、そしてサイバー

生きた情報がそこで生まれ、加工されるということは、すなわち、付加価値の源泉がそこにあるということである。通常、情報は、その用途によって逐次加工されていくが、その源流にいけばいくほど、逆にその用途は広い。情報をどのように加工するか、情報を如何にして付加価値に変えるか。こうした部分が、現場の知識、知恵であり、現場の強みが発揮されるベースとなる。

カイゼン活動と自律分散

製品の品質を極限まで高めるためには、製品技術、生産技術、そして現場の管理技術の3つが必要となる。どれか一つがかけても成り立たない。特に、現場の管理技術が、コスト削減や生産性の向上だけではなく、品質向上に大きく貢献する点は注目すべきである。具体的には、現場作業者あるいは作業チームのインセンティブ管理とカイゼン活動、カイゼンマインドである。これは自律分散型であり、自ら進化するシステムであり、新たなシステム論を理解する上で重要な要素となる。

カイゼン活動は、広い意味で問題解決の取り組みである。広い意味というのは、その取り組みのプロセスの大半を、問題発見、問題の定義などを含むからである。価値観や向かうべき方向性を共有したうえで、問題そのものは外部から与えられるのではなく、グループ内部で発見するプロセスからスタートする。このように、カイゼンによって自ら品質を向上させるしくみは、理論というよりも、意思決定に関するポリシーや、現場でのさまざまな活動における行動指針が重要となる。

たとえば、日本のほとんどの生産現場では、現場作業者の行動指針として、5S（整理、整頓、清掃、清潔、しつけ）を掲げ、すぐに目につく場所に掲示されている。5Sは、現場にあるさまざまな無駄を取り除くための基本であり、隠されていた問題を発見するための重要なツールとなっている。また、広い意味での問題解決のサイクルは、Plan（計画）—Do（実行）—See（確認）という3ステップではなく、Plan（計画）—Do（実行）—Check（解析）—Action（改善）の4ステップとなる。つまり、カイゼンによる現場そのものの自己変容のしくみが、システムの内部に組み込まれたものなのである。

物事を客観的な立場から、その原理や法則を見つけ出し、科学的な道具や手順に従ってそれを理論化し、普遍的な知としてそれを産業や社会に役立てていくというアプローチがある。一方で、より実践的、即効的な立場から、あるべき姿を共有し、目標をひとつずつ達成しながら、まずは身の回りの現実を作り替え、最終的あるいは結果的に産業や社会に貢献するというアプローチもある。現場学における行動指針や、カイゼン活動による品質への飽くなき追及は、まさに後者のプラグマティックなアプローチである。

人あるいは小集団が中心となって行うカイゼン活動や、ボトムアップな組織学習は、自律分散型のシステム理論として、これまで多くの学術研究や、分析事例があるが、それが、すでに述べたように自己変容をとともうため、エンジニアリングとして設計の対象となるシステム理論にはなりづらかった。

CPS では、デジタル化された情報技術とネットワーク技術を最大限活用し、物理的なモノ（物体）やコト（事象）がサイバー空間上で表現される。そして、こうして表現されたデジタル・ツインと呼ばれるモデルを介して、今度は実際の物理的なモノが連携する。

IoT では、モノとモノがインターネットを介してつながり、M2M というコンセプトが、機械や装置がダイレクトにつながることを強く意識しているが、こうしたIoT や M2M は、直接ではなく、サイバー上のこうしたモデルを介してつながるのであるというメッセージが込められている。

このように CPS は、未来の工場を想像するには、非常に多くのイメージーションを誘発させるコンセプトではあるのだが、IT 企業はともかく、実際の製造業の立場の関係者からの評価はあまり高くない。理由は、先に述べたとおり、製造現場のリアリティ、現場カイゼンによる自律的なシステムの変容など、生産現場の動的なふるまいや、それらを管理する現場技術が無視されているからである。いいかえれば、現場に根ざした人中心の視点を付加することで、よりリアルで生き活きとした CPS となるはずである。

もちろん、あえてそうした人間の要素、属人的な要素を除外することこそが、CPS が目指すところであって、そうした拡張を行うことは余計な介入であるという論者もいるだろう。しかし、それは次節で解説するように、あくまで人間がつくった人工物としてのシステムの話であって、限定された世界でしか成立しないシステム理論に支配されたものなのだ。どのような人工物も、人による何らかの意図によって設計され、いずれそのライフサイクルを終える運命にある。しかし、もしこれを、人を含むより大きなシステムとして定義すると、現実のさまざまな多様性と、尽きることのないさまざまな要望に対して、システムが常に進化することが可能となる。

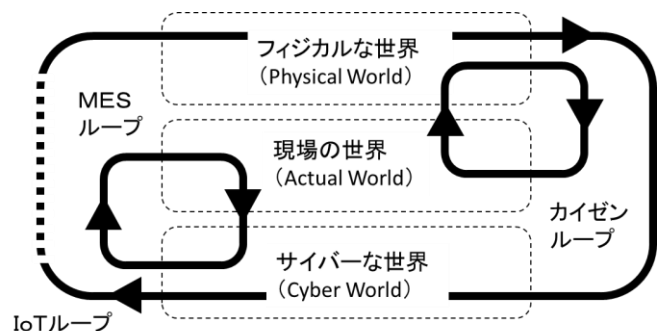


図2 サイバー・アクチャル・フィジカル世界

図2に、CPS を拡張したサイバー・アクチャル&フィジカル・システム概念図を示す。CPS は、サイバー世界とフィジカル世界をダイレクトにつなぐ1つのループを形成するが、これに対して、現場のアクチャル世界が加わっている。ここで、いわゆる現場のあらゆる活動は、アクチャル世界とフィジカル世界の間でのループとなり、これまでの IT や ICT は、アクチャル世界とサイバー世界とのループといえる。

CPS と現場システムが統合した新たなシステムを、サイバー・アクチュアル・アンド・フィジカルシステム (CAPS) と呼ぶことにすると、CAPS では、3 つのループが重なり合うことで、人を中核に据えた新しい IoT のしくみが、いわゆるエコシステムとして、進化可能な形で新しいものづくりをけん引していく体制がはじめて整う。

CAPS で重要なポイントは、デジタル化されたデータが、製品や設備といった知識そのものを表す場合 (RAMI4.0 ではタイプ情報と呼ぶ) と、日々の生産予定や実績などの事象を表す場合 (RAMI4.0 ではインスタンス情報と呼ぶ) があり、特に前者の知識情報をデジタル化し流通させることで、単純な効率化にとどまらずに、新たなビジネスモデルを含む、より革新的なものづくりが可能となる。いわゆる人工知能やビッグデータの活用は、サイバー空間上で、後者のデータを活用することが中心であるが、このように現場とのデジタルインタラクションにより、新しいビジネスチャンスや競争力につながる取り組みができる。

3 種類のシステム論

システムとは、「複数の要素で構成され、個々の要素が複雑に関係しあうことで全体としてまとまりのある振る舞いをするしくみ」である。システムに関する理論は、ノーバート・ウィーナーのサイバネティクスに代表されるように、まずは工学の世界で取り上げられ、そうしたモデルをより一般化し、あらゆる対象をシステムとしてとらえる一般システム理論へと発展してきた。そこでは、すべてのシステムは、同じ原理にもとづき構成されていることを前提に、社会現象や経営組織など、さまざまなシステムの振る舞いを説明しようとしている。

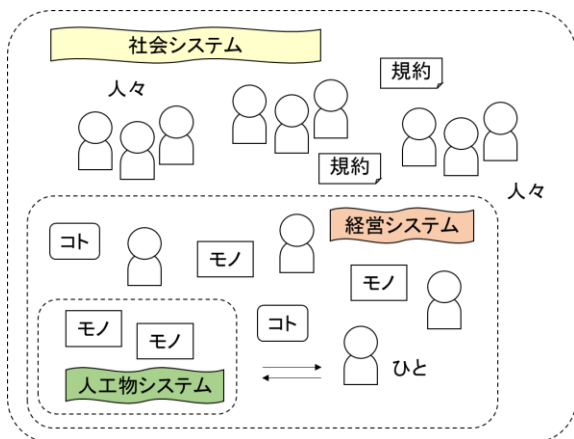


図3 3種類のシステム理論

こうした流れもあり、昨今注目されているサイバー・フィジカルシステムの語源は、サイバネティクスから来ている。しかし、人工物を対象とした人工物システムが、工場や企業などの経営システムと同じ原理にもとづいているとは、一般的な感覚からすれば考え難い。さらには、そうした工場や企業をつなぐサイバー・フィジカルシステムが、単独の工場や企業のしくみと同じ原理で説明することには限界がある。少なくとも、システムには図3に示すように、3つのレベルが存在することを前提として整理したい。それぞれについて、特徴と違いを明らかにする。

1) 人工物システム

古典的なシステム理論が対象とするのは、ほぼすべて人工物システムといってよい。人工物システムとは、対象システムを人工物として設計し、ゼロから作り上げることができるシステムを指す。これまでの多くの工学は、自然現象や法則を深く理解したうえで、さまざまな問題を解決するための機能を有する人工物を作り上げるための学問であったともいえる。人工物システムは、自然界のばらつきの範囲内であれば、その振る舞いに再現性がある点が特徴であり、研究室での実験によってその実現性や有効性は保証できる。ここではこれを、第一種のシステムと呼ぶことにする。

製造業が生産し販売する製品は、人工物あるいは人工物システムである。企業が提供するサービスも、多くの場合人工物システムであるといってよい。デジタル化が進む中で、人工物システムの機能の一部が、ハードウェアからソフトウェアに置き換わりつつある。人工物システムは、このようにハードウェアとソフトウェアが一体となって、あらかじめ意図された機能を実現するために設計された構造を持つ。こうした人工物システムは、それを利用する人が存在し、それを利用する人に対する振る舞いとしてその機能を提供することになる。

2) 経営システム

対象とするシステムとひととの関係に着目した場合に、人工物システムでは、それを利用するひとがシステムの外側に存在しているといえる。いいかえれば、提供されるシステムの中にそのひとは含まれていない。これに対して、システムの構成要素の一部に、ひとが含まれている場合もある。たとえば、生産ラインで働く人は、システムの一部であるが、システムのユーザーではない。

このように、システムの要素として“ひと”が含まれる場合は、人工物システムではなく、経営システムとして区別する。経営システムの特徴は、要素にひとが含まれるので設計どおりにいかない。自らの意図で自律的に変化する。ゼロからではなく、現行のしくみの改変や組み換えとなる。たとえば、先の例のような生産システムでは、多くの製造業の現場では、そのシステムは設計どおりにはいかないのが常である。ひとは、目的意識や行動規範というある意味であいまいなものにもとづき行動し、そこでは個人の損得感情なども左右する。一方で、特に、日本の生産現場は、カイゼンなどの活動もあり、自らの意図で自律的に変化する。これを、第二種のシステムと呼ぶことにする。

経営システムは、その構成要素にひとが含まれるため、設計者の意図どおりに各要素が動作せず、結果として意図した振る舞いとはならないという難点がある一方で、構成要素となるひとは、全体をみとおしたうえで、自律的にふるまうことが可能であり、場合によって、システムの内部構造を自ら変容させることも可能である。いわゆるカイゼン活動によって、当初の設計者が想定しなかった個別の状況やローカルな事情に対応して、ある程度の自由度のなかで、システムの構成そのものが変化するのである。いわゆる経営組織がそうであるように、こうした第二種のシステムを対象とする場合には、それを人

工物システムのようにゼロから設計するのではなく、現行のしくみの改変や組み換えを基本としたアプローチをとる必要がある。

3) 社会システム

システムとひととの関係という視点からすると、社会システムは、その構成要素として、個々の個性をもったひとではなく、不特定多数の人々が位置づけられる。社会システムにおける人々は、特定のカテゴリやセグメントで認識することはできるが、その行動を個別に把握することはできないし、制御することもできない。経営システムは、社会システムのひとつの要素となる。

複数のひとで構成される経営システムが、その振る舞いを厳密にはコントロールできないものの、ひとへのインセンティブのしくみを通して、ダイレクトにその方向性や個別のパフォーマンスをコントロール可能であるのに対して、社会システムは、そうしたコントロールがおよばない世界となる。たとえば、不特定多数の企業で構成されるサプライチェーンでは、全体最適化という概念が存在しないし、そもそも不可能である。株式市場や為替レートなど、不確実性がきわめて高い指標などは、こうした社会システムにおける不確実な関係構造の中で生まれるものである。ここではこれを、第三種のシステムと呼ぶことにする。

もちろん、社会システムであっても、それをあるべき方向へ誘導しようとコントロールする立場のひとは存在し、そのためのオペレーション手段もある。特に有効なのが制度設計であり、たとえば、規約やルール、あるいは報酬に関する指標の設定方法によって、システム全体の様相が大きく変わってくる。そのような制約が、どのような状況で、そのようなステークホルダーに有効となり、それによってうすぼんやりと社会システムをデザインするというアプローチは可能かもしれないが、現実はそのように意図どおりにいくことは大方ありえない。

IoTのエコシステムは、社会システムとして位置づけられる。なぜなら、そのシステムを構成する企業は、お互いに他の企業の行動について強制力がないからである。結果として、成長するエコシステムもあれば、おもったようにメンバーが集まらずに消滅するエコシステムもある。経営システムに若干似ている部分もあるが、構成要素は、組織、あるいは人々とそれをたばねる制度のみとなる。とはいえ、エコシステムは、誰かが何らかの意図をもってコントロールしている場合が多い。

このように、システムを3種類に分け、古典的な人工物システムとはべつに、経営システム、社会システムについて、それらを設計あるいはコントロールするための基本的な視点が異なることを前提として、これからは、経営システムや社会システムについて、さらにコントロール可能な手法を見つけ、開発していかなければならない。特にIoTのエコシステムを対象とする場合に、従来のシステム理論とは異なる視点で、そのようなシステムの成長や衰退の原因をとらえ、的確な対応をとれるような準備が必要となる。

横断領域の研究と人材教育

人工物システムを対象とする第一種のシステム理論ではなく、経営システムや社会システムをも対象とする第二種、第三種のシステム理論にもとづき、現実的な意味で、新たな産業革命をささえていく必要がある。すでに指摘したように、こうしたアプローチは、純粋に理論の世界で閉じたものではなく、実践がともなって初めてその成果が評価される。

こうした理論と実践をつなぐアプローチでは、実践に重きをおく企業側のスタンスとともに、それらを理論化し、できるだけ汎用性のある手法として、定義可能なかたちで問題を切り出し、それをより高度なレベルで機能させるための学術側の理論的、研究開発の取り組みも欠かせない。

ここで、やや強引に、理論の世界≒サイバーな世界、実践の世界≒フィジカルな世界とくと、理論と実践のサイクルは、サイバー・フィジカルシステムであるといえるかもしれない。いずれにしても、理論と実践をつなぐためには、学術的な分野、あるいは技術的な領域として、図4に示すような横断的な取り組みの対象領域は、どれ一つ欠けても成立しない。以下に、それぞれの内容について簡単に説明する。

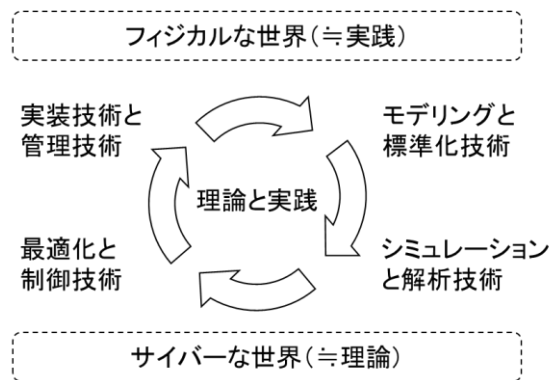


図4 理論と実践の対象領域

1) モデリングと標準化技術

モデリング技術は、問題や課題を明らかにし、モデルとして記述するための技術である。モデリングは、現実のさまざまなモノやコトを、なんらかの視点によって切り出す行為でもあり、視点によって同じ対象も異なったモデルとして表現される。

また、標準化技術は、それぞれ個々に異なるさまざまな問題から、共通点を見つけ出し、抽象化や汎用化を意識した構成要素を増やすことで、対象とする全体の複雑性を減らす技術である。

2) シミュレーションと解析技術

シミュレーション技術とは、モデル化された内容をもとに、現実のモノを物理的に操作するのではなく、理論上で操作または計算し、その中で解決案を探すための技術あるいは手法である。モデリング技術がシミュレーション結果に大きく影響するが、モデルが同じでもシミュレーション技術によって、そこから多くの新しい情報を

引き出すことができる。

解析技術は、フィジカルな世界から得られた事実やデータについて、その因果関係をもとに、原因となる未知の事象を探し修正するための技術である。また、新たなデータに対応する新しい法則や規則性を見つけ出すことで、将来起こり得る事象に対応する。

3) 最適化と制御技術

最適化は、対象とする問題を、あらかじめ決められた表記方法にしたがって定義されたモデル上で、要求された目的を達成し、評価の指標が最大となるようなパラメータを明らかにする技術である。一般的に、求めたい解は、複数のパラメータで構成されており、それらの値の組み合わせは膨大なであるが、最適化技術によって、効率よく、かつ現実的な時間でそれを求める。

また、そうして明らかになったパラメータを現実に応用した場合に、その結果としてフィジカルな世界が変化するが、そうした影響をリアルタイムな環境のなかでとらえ、望ましい方向へ変えていく技術が制御技術といえる。

4) 実装技術と管理技術

最適化された解をフィジカルな世界に適用するためには、当初モデリングの時点で取り込むことができなかつたさまざまな現実を含めて、対応する必要がある、多くの場合、その結果は想定したものとは異なる。実装技術は、こうした差異も考慮して、最終的にフィジカルな世界を操作し変更する技術である。

そして、フィジカルな世界は、日々そのおかれた状況に対応して、そこにある仕組みや方針にしたがって運営されていくが、そうしたダイナミックな状態の繊維を、その都度、望ましい方向へむかうよう調整し、必要におうじて新たな問題発見、問題解決をうながすのが管理技術といえる。

ものづくりのためのシステム理論は、このようにさまざまな既存の研究領域や技術領域の問題、課題で構成されている分野横断的なものである。これらの4つのグループは、単独では機能せず、すべてが繋がったときに、はじめて理論と実践が繋がった理論体系となる。

そこで、こうしたものづくりのためのシステム理論およびそれを包含するさまざまな研究分野、技術分野を、現場学として、新しい学問領域とするのはどうだろうか。現場学では、単に、機械的な生産システム、つまり人工物のみではなく、そこで働く人が自ら知恵を使ってカイゼンするしくみでもある第二種の経営システムも含んでいる。デジタルな世界とアナログの世界を併せ持ち、サイバーな世界とフィジカルな世界を併せ持つ。これまでは、問題解決の理論と呼ばれることや、対象を特定しないメタ理論などと呼ばれていたこともある、そうした理論的部分を、広い意味でのものづくりの現場という対象でくくることで、さらに新しいフロンティアが広がるかもしれない。

発行者：一般社団法人インダストリアル・
バリューチェーン・イニシアティブ
〒103-8548 東京都中央区日本橋小網町 14-1
モノづくり日本会議内
電子メール：office@iv-i.org URL: http://iv-i.org

発行日：2016年6月17日

(発行者に無断で複製または印刷を禁止します。)