

# Smart Manufacturing と System of Systems

○熊谷 渉 鎌田 健一 奥田 有紀 (横河電機株式会社)

## Smart Manufacturing and System of Systems

\*Wataru Kumagai, Ken'ichi Kamada, Yuki Okuda (Yokogawa Electric Corporation)

**Abstract**— Toward Society 5.0, Yokogawa Electric Corporation aims to become an integrator in a world where Systems of Systems (SoS) are implemented in society, and create value by overall optimization through autonomous and integrated SoS. This paper introduces the definition and systematic classification of SoS and Yokogawa Electric Corporation's efforts on Community Energy Management System. Finally, we discuss the prospects for the Cyber-Physical Human System from the perspective of Smart Manufacturing.

**Index terms**— Smart Manufacturing, System of Systems, Community Energy Management System

## 1 はじめに

Society 5.0 (超スマート社会)<sup>1)</sup>は、我が国が目指す未来社会として 2016 年に提唱された構想で、「サイバー空間 (仮想空間) とフィジカル空間 (現実空間) を高度に融合させたシステムにより、経済発展と社会的課題の解決を両立する人間中心の社会」として定義されている。Society 5.0 の提唱以降、その実現に向けて研究開発・実証実験が産学を中心に進められている。

Society 5.0 では、Internet of Things (IoT) によって、現実空間から膨大な量のデータが仮想空間内に自動的に収集・蓄積され、仮想空間内ではこのビッグデータを高度な情報技術により解析された後、その結果が現実空間で生活を営む人間にフィードバックされる。Society 5.0 の社会実装における重要な概念として、Cyber-Physical System (CPS) や System of Systems (SoS) が代表的である<sup>2)</sup>。CPS は、仮想空間と現実空間を有機的に結合したシステムだが、Cyber-Physical Human System (CPHS) は CPS を人間中心のシステムとして捉え直したものであり、Society 5.0 の概念と非常に類似している。また、SoS は、要素システム同士が相互作用によって連結された超システムだが、Society 5.0 では異業種のインフラ同士が連携し合って超システム化することから、重要な概念として位置づけられる。

本稿では、一般的な SoS の定義・分類を述べた後、SoS として解釈した電力システムの事例を紹介する。さらに、横河電機株式会社を始めとする製造業と SoS の関係、および Community Energy Management System の事例について紹介する。最後に、製造業の観点から、Cyber-Physical Human System への展望を述べる。

## 2 System of Systems

### 2.1 System of Systems の定義

本章では、System of Systems (SoS) の定義・分類について述べる。Maier による SoS の初期の定義は、運用的独立性・管理的独立性を具備する要素システム同士が連結され、一つのシステムとして振る舞うものである<sup>3,4)</sup>。その定義に基づく SoS のイメージ図を Fig. 1 に示す。運用的独立性・管理的独立性の定義は以下の通りである。

- 運用的独立性：各要素システムは単体でも、有用なものとして個々独立に動作する。

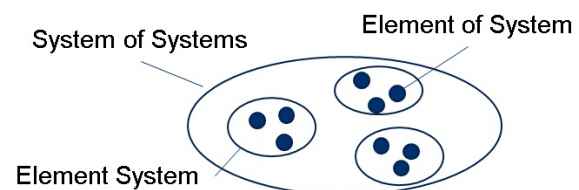


Fig. 1: Overview of System of Systems.

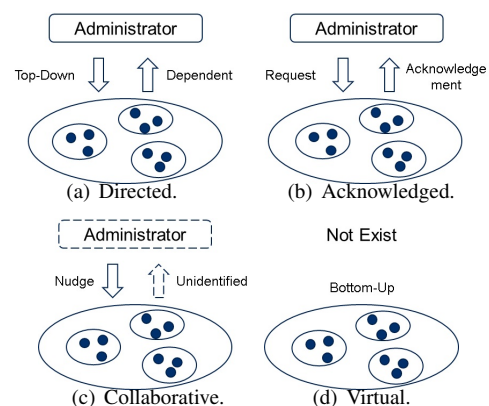


Fig. 2: Four Types of System of Systems.

- 管理的独立性：各要素システムは単体でも、システムの管理権限を保有しており、連携する場合でも独立に運用可能である。

さらに、SoS の代表的な分類として以下の 4 種類が知られており<sup>4)</sup>、そのイメージ図を Fig. 2 に示す。

- 指揮命令型：要素システムは全体のために管理構築され、通常はそれに従属する。
- 要請承認型：要素システムは SoS 管理者からの要請に対して承認・合意することで、SoS として共同する。
- 協力型：要素システム間の相互作用によって、SoS 全体の目的が形成・合意されることで、要素システムが組織化される。
- 仮想型：要素システム間の相互作用から、結果的に SoS としての振る舞いが創発する。

この分類に基づくと、各要素システムの独立性が強いとき、各要素システムが協調しながら、ボトムアップ

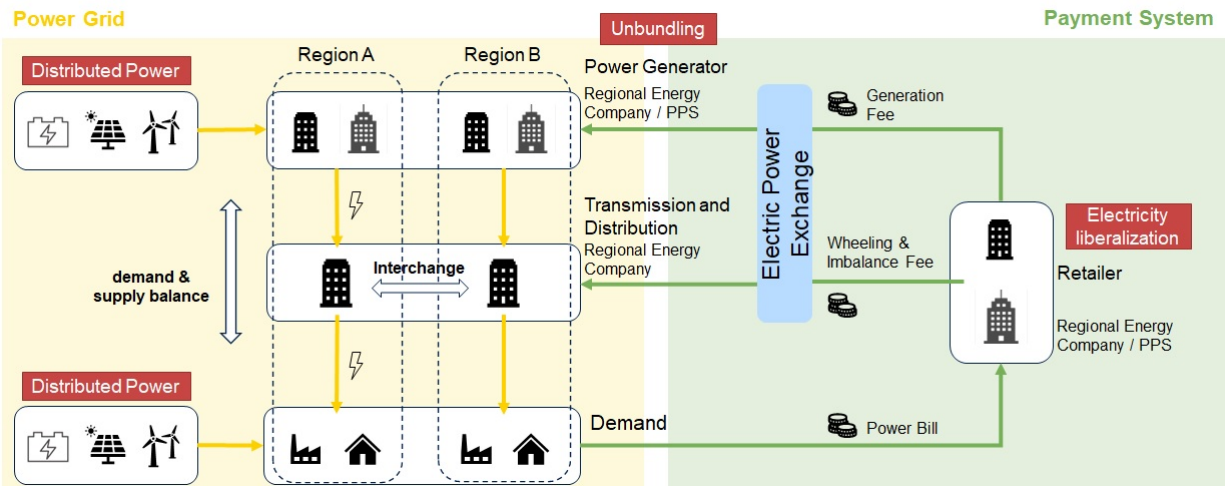


Fig. 3: Example of Domestic Energy System as System of Systems.

的／自律的／創発的／動的に SoS を形成するという点  
が、SoS の大きな特徴といえるだろう。ただし、近年  
は以上の定義に限らず、SoS の実態も多様化している  
ことが指摘されている点に注意されたい<sup>5)</sup>。

## 2.2 System of Systems の事例

本節では、国内の電力システムを SoS として分析し  
た事例を示す。近年の電力システムは、発送電分離や  
分散型電源の導入に伴って、要素システムへの分断化  
および要素システム個別の目的の追求が進み、ますます  
大規模・複雑化している。

国内の電力システムを SoS として解釈した図を Fig. 3  
に示す。Fig. 3 の左側は電力系統、右側は料金支払シ  
ステムを表している。電力系統運用の本来の目的は、電力  
需要を満たす範囲で、発電側のコストを削減するよう  
に、発電側と需要側の電力需給平衡を維持すること  
であった。国内の電力システムは、地域毎に発電所を構  
えている大手地域電力会社が発電部門、送配電部門、小  
売部門を統合して運用する垂直型構造であったが、2016  
年の電力小売完全自由化などの発送電分離によって、異  
なる事業者が各部門を運用する水平型構造へ変容した<sup>6)</sup>。  
特に発電事業者および小売電気事業者として、大手  
地域電力会社だけでなく、旧分類の特定規模電気事業  
者（PPS、新電力）を始めとする事業者が自由に参入  
した。その結果、一般家庭や工場などの需要家は、小  
売電気事業者と自由に契約し電力が供給されることに  
対して、小売電気事業者は、電力卸市場と連動した電力  
売買によって、委託料金やインバランス料金等を支払  
いながら電力を調達する仕組みとなった。さらに、環  
境負荷の観点から、再生可能エネルギー利用を推奨  
するため、発電側・需要側の両方で、太陽光発電、蓄  
電池および風力発電などの分散型電源の導入が進んで  
いる。このように、近年の電力システムは、大規模化・複  
雑化に伴って、全体的にコストが発生する箇所が増え  
ていると同時に、電力需給平衡も課題となっている。

電力システムでは、多様な立場の事業者が参入して  
いるため、ローカルな管理目的は相反する関係だが、需  
給平衡という全体目的のためにグローバル的には協調  
する構造が形成されている。さらに、需要家は一方  
に電力供給されるだけでなく、分散型電源を用いて自  
ら発電することや、需要パターンを変化させるデマン

ドレスポンス<sup>1)</sup>に対応するなど、需要家の意思決定も需  
給平衡に影響を与える形となっている。よって、電力  
システムは、電力需給平衡や全体コスト削減を達成す  
るよう、複数の事業者間、需給間で連携する SoS と  
してみなすことができる。つまり、2 章の SoS の定義・  
分類と照らし合わせると、「要請承認型」と「協力型」  
のハイブリッドだと捉えられる。ただし、将来的には、  
アグリゲータの参入によって、需要家への電力配分  
についてもより複雑化することから、要素システムの独  
立性がますます強まり、完全な「協力型」に発展する  
ことも予想される。

## 3 製造業と SoS

### 3.1 製造業の Smart Manufacturing

近年、製造業の将来の姿として Smart Factory や Smart  
Manufacturing、Connected Industries などの用語がしば  
しば謳われる<sup>7)</sup>。Smart Factory は人工知能（AI）やロ  
ボットなどのデジタル技術の活用によって、工場・プラ  
ントの機械・システムをスマートに連携させる取り組み  
であることに對して、Smart Manufacturing や Connected  
Industries は、プラントや企業を超えたもの同士を接続・  
連携させる取り組みである。よって、後者の取り組み  
は、プラントを中心とした SoS をイメージしている。

著者らが所属する横河電機株式会社も、従来、産業界  
の工場やプラントを主な顧客としてきたが、Society 5.0  
やサステナビリティ目標の達成に向けて、業界構造や  
重点的な取り組みが変容している。例えば、横河電機株  
式会社の中期経営計画「Accelerate Growth 2023」では、  
SoS が社会実装された世界でのインテグレータとなり、  
自律化や統合化によって SoS を通した全体最適の価値  
創出を目指すことを述べている<sup>8)</sup>。その SoS 実現に向  
けた軸・側面として、「IA2IA（Industrial Automation to  
Industrial Autonomy）<sup>2)</sup>」と「Smart Manufacturing<sup>3)</sup>」を  
掲げている。Fig. 4 に示す通り、この二つの軸に沿って  
「操業の自律化」と「カバー範囲の拡大」が進むと、SoS

<sup>1)</sup> 需要家の契約電力超過や需給が逼迫した際に、需要抑制を要請  
する方策のこと。

<sup>2)</sup> プラントの設備や操業自体が、学習し、適応する機能をもつよ  
うになること<sup>9)</sup>。

<sup>3)</sup> バリューチェーン全体（原料の調達から製品の納品まで）、およ  
び設備とプロセスのライフサイクル（計画、設計、建設、試運転、立  
ち上げから生産／製造、保守）をカバーする End to End なソリュー  
ションによってパフォーマンスを向上させる取り組み<sup>10)</sup>。



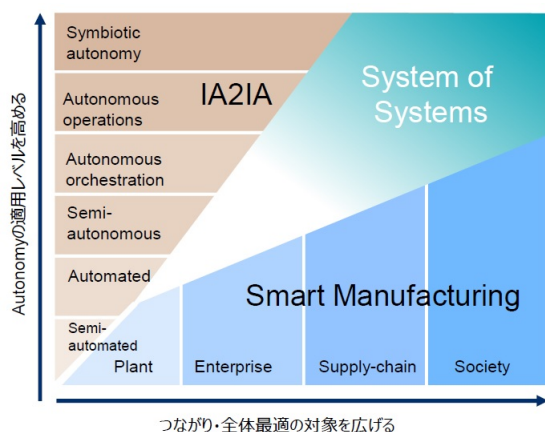


Fig. 4: Overview of SoS by YOKOGAWA<sup>6)</sup>.

へ発展すると考えている。このように製造業は、Smart Manufacturing に基づき、従来の顧客に閉じたローカルなサービスではなく、社会・地域のインフラ同士、あるいはサプライチェーン全体を連携したグローバルな構想のもとで、SoS を前提とした価値・サービスを提供する形態を目指す傾向にある。

### 3.2 Community Energy Management System の事例

本節では、Community Energy Management System (CEMS) の事例を紹介する。Fig. 5 にこの事例におけるシステムの全体像を示す。この事業では、複数の工場と住居地帯が隣接している工場団地に、中心的な事業体が運営する自家発電設備を活用する CEMS が導入された。具体的には、自家発電設備（ガスコージェネレーションシステムや太陽光発電、蓄電池）から供給されるエネルギー（電力・熱）と、地域電力会社から購入した電力を、全体のエネルギー管理システムによって制御・最適化し、工業団地内需要家（7 社）へ効率的にエネルギー供給を行う。また、Dynamic Pricing<sup>4</sup>やデマンドレスポンスを導入することで、より高度な需給平衡を実現している。さらに、長期停電などの非常時には、工場団地内需要家への最低限なエネルギー供給だけでなく、大手地域電力会社に自家発電設備の余剰電力を販売し、地域電力会社を通して周辺の防災拠点へ供給することで、災害対策の役割も担っている。横河電機株式会社は、以上のエネルギー管理システムを構築した。

この事例では、各工場（需要家）がそれぞれ生産計画やエネルギーを管理する監視・制御システムを独立に管理・運営しているが、全体管理者である中心事業体から需要抑制の要請を受けるため、各自の生産状況や経済性と照らし合わせながら、その要請に合意・承認することで共同している。つまり、2 章の SoS の定義・分類と照らし合わせると、「要請承認型」だと捉えられる。ただし、この事例では、各需要家が類似の業種で統一されているため、トップダウン的なエネルギー管理が比較的実現しやすい点に注意されたい。Society 5.0 では、一般家庭の需要家や異業種のインフラ（モビリティなど）同士との連携も想定されており、その場合には各要素システムのボトムアップ的かつ創発的な影響を考慮した管理体制が必要となるだろう。

<sup>4</sup>グリッド全体の低負荷に連動させて電力料金の割引時間帯を設定することで、需要家側の負荷調整を促す方策のこと。

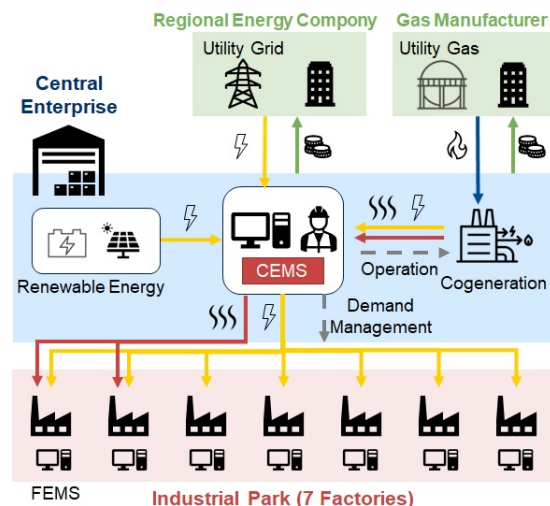


Fig. 5: Example of CEMS in Industrial Park.

## 4 Cyber-Physical Human System への展望

本章では、製造業における、Cyber-Physical Human System (CPHS) への展望について述べる。3.1 節で述べたように、横河電機株式会社が掲げる方針として、接続範囲が広がる Smart Manufacturing 以外に、IA2IA（プラント操業の自律化）がある。従来のプラント操業は、プラントのオペレータがセンサデータから操業状態を監視しながら、制御システムをマニュアルで操作することで実現していたことに対して、プラント操業の自律化は、デジタル技術の活用によって、その操作の自動化だけでなく、適応的かつ最適な対応を実現する考えである。つまり、この方針は、プラント操業において、重要な意思決定者を除き、従来業務を行うオペレータ（人間）を削減する方向に向かう。このため、プラント向けの製品・ソリューションは、ローカルな範囲においては、人間との直接的な接点が疎になる可能性がある。

一方、プラントは、今後一つの産業インフラとして、サプライチェーンや地域全体との繋がりが強化されて SoS に発展することで、グローバルな範囲において人間との間接的な接点が増加することが期待される。この影響の例として、GHG プロトコルのサプライチェーン排出量が挙げられる。GHG プロトコルは、事業者の温室効果ガス排出量の算出方法で、我々の環境負荷を低減させる目的で国際的に定められている<sup>11)</sup>。この定義では、自社での直接排出（Scope1）、自社での間接排出（Scope2）、他社での間接排出（Scope3）に分けて算出した値を合算した「サプライチェーン排出量」を指標とする。つまり、プラントを起点とした SoS の管理・最適化が実現されていくにつれて、各自の責任は、生産者・消費者間という限られた範囲の経済的合理性に限らず、間接排出に携わる人間を含めたサプライチェーン全体へと拡大されていくと言えるであろう。このように、SoS や CPHS の普及に伴い、サプライチェーンや地域全体に属する人間の生活への影響を考える必要がある。よって、製造業である横河電機株式会社も、SoS や CPHS に大きな目的を与えると同時に、Society 5.0 の貢献に向けたサービスを創出することを目指したいと考えている。

## 5 おわりに

本稿では、一般的な SoS の定義・分類を述べた後、SoS として解釈した電力システムの事例を紹介した。さらに、製造業である横河電機株式会社は、SoS のインテグレータを目指していること、および Community Energy Management System の事例について紹介した。最後に、製造業の観点から、Cyber-Physical Human System への展望を述べた。

## 参考文献

- 1) 内閣府, [https://www8.cao.go.jp/cstp/society5\\_0](https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0) (2023.10.19 アクセス)
- 2) 小川雅晴, 小野晃, 貝原俊也, Society 5.0 を実現する概念と用語, 計測と制御, **60**-9, 670/677 (2021)
- 3) M. W. Maier, Architecting Principles for Systems of Systems, Systems Engineering, **1**-4, 267/284 (1999)
- 4) J. Dahmann and K. Baldwin, Understanding the Current State of US Defense Systems of Systems and the Implications for Systems Engineering, IEEE Systems Conference, 7/10 (2008)
- 5) Z. Fang, System-of-Systems Architecture Selection: A Survey of Issues, Methods, and Opportunities, IEEE systems Journal, **16**-3, 4768/4779 (2022)
- 6) 安田恵一郎, 所健一, 電力・エネルギーの効率活用のための社会基盤のスマート化, 計測と制御, **55**-8, 698/703 (2016)
- 7) 経済産業省, [https://www.meti.go.jp/report/whitepaper/mono/2018/honbun\\_pdf/index.html](https://www.meti.go.jp/report/whitepaper/mono/2018/honbun_pdf/index.html) (2023.10.19 アクセス)
- 8) 横河電機株式会社, <https://www.yokogawa.co.jp/about/yokogawa/company-overview/corporate-strategy/> (2023.10.19 アクセス)
- 9) 横河電機株式会社, <https://www.yokogawa.co.jp/solutions/featured-topics/digital-transformation/smart-manufacturing/> (2023.10.19 アクセス)
- 10) 横河電機株式会社, <https://www.yokogawa.co.jp/solutions/featured-topics/ia2ia/> (2023.10.19 アクセス)
- 11) 環境省グリーン・バリューチェーンプラットフォーム, [https://www.env.go.jp/earth/ondanka/supply\\_chain/gvc/estimate.html](https://www.env.go.jp/earth/ondanka/supply_chain/gvc/estimate.html) (2023.10.19 アクセス)