

情報とシステム，新しいシステムズアプローチへの視点

喜 多 一*

* 京都大学 国際高等教育院 京都市左京区吉田二本松町
 * Institute for Liberal Arts and Sciences, Kyoto University, Yoshida-Nihonmatsu, Sakyo, Kyoto, Japan
 * E-mail: kita@media.kyoto-u.ac.jp

キーワード：システム (system), 情報 (information), モデル (model), プラットフォーム (platform).
 J-L 0008/16/5508-0675 ©2016 SICE

1. はじめに

科学技術の発展により人類はその生活を改善するとともに活動を急速に拡大してきた。しかしながら，人類の活動の急速な拡大により現代社会は人口や環境，貧困，といったさまざまな，なおかつ深刻な問題をも抱えている。近年「スマート」という言葉をキーワードに社会的課題に対する技術的な取り組みが語られるようになってきている。第5期の科学技術基本計画¹⁾では未来像として「超スマート社会」を描き，それを推進するキーワードとして Society 5.0 を掲げて，取り組むべき社会的課題も例示している。

より「スマート」な社会を目指そうとするものの技術的背景には，半導体の集積度についての技術予測である「ムーアの法則」が長期にわたって実現されてきたように計算，記憶，通信といった面で性能が何桁も変わる技術の長足の進歩があり，インターネットなどで接続された地球規模のコンピュータネットワークが出現したことがある。ネットワークに接続されるコンピュータは，組織単位で保有していたコンピュータから，個々人が使う机上の端末に，そして常時稼働し携帯する携帯端末へと拡大し，その先にさまざまな機器がネットワークにつながる「もののインターネット Internet of Things, IoT」が注目されている。

これにより物質的な過程として存在する実世界と，情報的な過程として存在する仮想世界がより緊密に結合した Cyber-Physical-System, CPS が構成される。また個別的に構成されてきたシステムが統合され，より高度な機能を実現する System of Systems も期待されている。

このように社会的な問題を解決する仕組みの構成を支える要素技術が揃ってきたことがより「スマート」な社会を実現することへの期待につながっている。しかしながらスマートな社会を実現するための課題は，人工物として Cyber-Physical-System なり System of Systems なりを構成し，運用するための技術であり，価値を創出するために複雑な人工物を構成するためのシステム・情報領域の技術である。しかしながら，その具体的な課題は必ずしも明確ではない。

本稿では，よりスマートな社会の実現に向けての新しいシステムズアプローチを考える基礎として，学部教育

のカリキュラムなどを手掛かりにシステム領域と情報領域の知について整理をした上で，システムズアプローチとして今後，何を考えて行くべきかを検討したい。

2. システム技術と情報技術

よりスマートな社会を実現することを視野にシステム技術と情報技術の両面で何が求められるかを考えなければならぬ。このために，まず両者について，その類似点と相違点を整理しておく。

2.1 システム技術と情報技術の類似点

本学会にシステム・情報部門が置かれているように，システム科学・工学と情報科学・工学は比較的近い分野だと考えられている。その背景には，ウィーナが提唱したサイバネティクス²⁾に代表されるように，両分野は黎明期において共有する視点をもち，またシステム技術は計算機の利用とともに進展してきた分野であること，他方で情報技術も「情報システム」という言葉が広く使われているように計算機を実応用するにあたってシステム化が求められることにあろう。

システムと情報の2つの領域の共通点として，いずれの技術もその「汎用性」を挙げることができる。横断型基幹科学技術研究団体連合 (横幹連合) ではこのような科学技術を以下のように定義して³⁾，関連分野の学会の連合体として研究を促進している。

横断型基幹科学技術とは，論理を規範原理とし，自然科学，人文・社会科学，工学などを横断的に統合することを通して異分野の融合を促し，それにより新しい社会的価値の創出をもたらす基盤学術体系である。

〔補足説明〕たとえば，社会，人間，環境，生命，経営，組織マネジメントなどを扱うために生み出された，統計学，シミュレーション学，最適化手法，情報学，設計学などの学術体系である。

システム科学・工学は対象領域をモデルとして抽象化し，システムとして捉えた上でそのモデルシステムに一般的に適用できる汎用的な手法を数理的なアプローチを中心に開発し提供してきた。

他方，コンピュータや通信は「情報」を汎用的に扱う技術であり，情報科学・工学は対象における情報の収集，伝

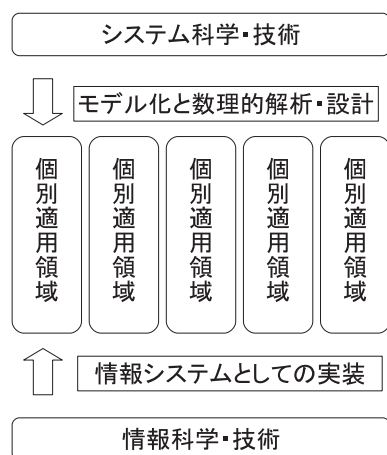


図1 システムと情報、類似点と相違点

送、蓄積、処理などに汎用的な技術を提供するとともにその背景にある計算論的基礎を提供してきた。図1参照。

2.2 システム技術と情報技術の相違点

一方で両分野が個別に存在していることは、それぞれの所掌分野に相違があることを意味する。

システムの科学・技術ではこれまで、物理的なシステム、特定の機械や工場など閉じたシステムを主な対象にシステムのモデル化やシミュレーション、最適化などを考えてきた。また経済学・経営学などとも接続して人や社会の意思決定を扱っている。さらに、サイバネティクス²⁾以来、人工物を考えるに際して生物との共通性を探る視点をもっており、進化的計算の隆盛の中で「進化」や「創発」などのメカニズムもテーマとして取り上げてきた。実用されている分野の多くは既存の工学領域であることから、数量的に捉えられる対象を中心に数理的なアプローチで接近していることが基本的な特徴だと言える。

他方、情報の科学・工学では電子工学を物理的基盤としてコンピュータやデジタル通信を中核に計算や通信メカニズムの実現と、ソフトウェアによる機能の実現からなる実装技術を探求してきた。またそれを支える計算や通信の理論を発展させている。

情報通信技術そのものはきわめて汎用的な技術であり、特定の応用領域と結びつかない限り価値を創出しないが、電子工学を基盤とする実装技術を所掌している点でディシプリンとしての固有性がある。計算機ハードウェア・ソフトウェアによる情報処理を中核に実装技術としての情報システムのアーキテクチャなどを考えてきており、半導体技術や情報ネットワークの進歩とともに分散処理と集中処理の在り方が常に見直されている。

3. システムの知、情報の知

知識体系はそれが科学者、技術者に内面化されてはじめて活用される。その意味で大学レベルのカリキュラムに注目することはそれが科学者、技術者の思考の基盤を形成している点で重要である。本章では前章で見たシス

テムと情報の知について工学系のカリキュラムなどを参照しながら、両者が補完的関係にあるものの、その接点が弱いことを指摘し、よりスマートな社会を実現するための科学、技術として考えるべきことを検討したい。

3.1 システム科学・工学教育で扱われる知

システム科学・工学領域については残念ながら学部レベルのまとまったカリキュラムが学会などで提案されている訳ではない。これは、システム領域のもつ汎用性から、ある程度具体的な工学領域に接続されて学科などが構成されているということにもある^(注1)。

ここでは、本会誌の2007年4月の特集号「システムを考える、システムで考える」⁶⁾から、教授内容を探る。同誌の特集号はシステム系の大学院に進学した修士1年生や企業の新入社員へのチュートリアル的な企画として構成されたもので、以下のような解説で構成された：

- システムのモデル化：ダイナミカルシステム入門／システム構造／離散事象システム／不確実性下の意思決定理論—経済心理学から総合システム科学へ—／オブジェクト指向モデリング
- システムの解析と設計：最適化／学習と進化とシステム思考／シミュレーション／統計力学的アプローチのココロ／発想法
- システムと人：信頼性とヒューマンシステム／多目的と社会ゲーム／多主体系のシステム論—問題解決方法論の基礎としての／組織とマネジメント

これらがおおむねシステム科学・工学領域の問題意識である。「オブジェクト指向のモデリング」は情報システムとしての実装を意識して、また「発想法」は昨今のデザイン学教育につながるものとして取り上げられている。なお、「計測」や「制御」という概念がシステム科学・工学にとって重要であることは言うまでもないが、本会誌の特集号という性格から計測工学、制御工学についての話題は別途、企画されたため含めてはいない。

3.2 情報科学・工学教育で扱われる知

情報分野では、情報処理学会がカリキュラム標準を定めており、現在、公開されているものはJ07⁷⁾である。また日本学術会議でも情報学分野の参照基準⁸⁾が策定された。

J07は以下の5つの専門分野を想定したカリキュラム群として構成されている：

- CS: コンピュータ科学
- IS: 情報システム
- SE: ソフトウェアエンジニアリング
- CE: コンピュータエンジニアリング
- IT: インフォメーションテクノロジー

(注1) 似たような事情にある分野として近年注目されている統計学がある。わが国では統計数理研究所など限られた組織以外では個別の領域に埋め込まれる形で統計学とその教育が行われてきた。また、近年のデザイン学への注目^{4), 5)}も問題解決としてのデザインの考え方が領域横断的な性格をもつためと考えられる。

これに加え学部によらない情報教育として一般情報教育 (GE) が示されている^(注2)。

専門分野の中核となるコンピュータ科学 (CS) では以下のような項目群からなる知識体系を示している：

離散構造，プログラミングの基礎，アルゴリズム，アーキテクチャと構成，オペレーティングシステム，ネットワークコンピューティング，プログラミング言語，ヒューマンコンピュータインタラクション，マルチメディア表現，グラフィックスとビジュアルコンピューティング，インテリジェントシステム，情報管理，社会的視点と情報倫理，ソフトウェア工学，計算科学と数値計算

ハードウェアとソフトウェアから構成されるコンピュータの技術についてその後ろ支えとなる理論とともに積み上げて行くカリキュラムであると捉えることができる。

3.3 システムの知と情報の知の接点

先に見たシステム科学・工学と情報科学・工学に共通して取り扱われている話題としては人工知能系の技術であるとか，ユーザインターフェイスなどが見て取れる。

他方で，CPS など仮想世界と実世界がより密に接続した今後のシステムを考える上では重要なことながら相互にあまり関心がない部分について見ておく必要がある。

情報工学・科学のカリキュラムにおいて興味深い点としては，J07 などでは制御工学で扱っている意味での「(フィードバック) 制御」やシステム科学で扱っている「意思決定」などがあまり取り扱われないことである。J07 で示されたカリキュラムでも制御は CE などと言及されるが扱いは小さく，意思決定は IS の中で扱われているが他の分野ではあまり扱われない。このことは，情報系のカリキュラムの中で，「制御」や「意思決定」のように「情報を使う」ことへの意識がそれほど高くないことを示している。実際，筆者は大学の現場で情報システムの運用などにも携わってきたが，情報系の技術者には「閉ループ」という発想が欠けていたりする。

他方で，システム科学・工学領域を含めて，情報系以外の工学の諸領域での教育カリキュラムにおいて情報システムや大規模なソフトウェア開発について教えることは限られている。工学の諸領域では，シミュレーションやそれを支えるプログラミングと数値計算，アルゴリズムなどの教育は多く扱われているが，仮想世界が急速に拡大する状況において，それを支えるシステムの話題として情報システムやソフトウェア開発などが扱えていないと考えられる。

専門教育についての調査ではないが，一般情報教育につ

^(注2) 初等中等教育から大学の教養教育に至るまで一般教育としては実学の教育は重視されていない。情報教育は中学校の技術科，高校の情報科など必修科目となっている数少ない実学教育である。

いて，2014，2015 年度に国内の大学を対象にアンケート調査が行われた^{9)，10)}。そこでは教授内容について情報処理学会が提唱している一般情報教育の知識体系 (GEBOK) に沿って尋ねているが，情報システムやモデル化などは GEBOK で取り上げられているにもかかわらずあまり教授されていない。

これらが扱われていない要因としては，授業時間の制約や専門性の高さなどもあり，特定はできない。しかしながら授業担当教員の多くは情報系のバックグラウンドを専門性として必ずしももたないことも示されている。このため，専門外の教員がこういった話題への関心や知識をもっていない可能性も示唆される。

今後，新しいシステムズアプローチを考える上では，システム分野と情報分野の専門家が協力することが不可欠であると考えられるが，それを促進するためには相互の分野で基礎知識を共有する必要がある。このために以下のことを提案したい：

- 情報分野では物理世界への関与が拡大するとともに，自動化や最適化などが扱われる。制御や意思決定の基礎知識は自動化や最適化を考えるために必須のものであり，システム領域の研究者・技術者との協力を効果的なものにできると考えられる。
- システム分野では急速に拡大する仮想社会について，情報分野の科学者・技術者と協力して仮想社会を能動的に構成することを考えるために，情報システムの設計や大規模なソフトウェア開発についての基礎知識をもつことが望まれる。

4. 新しいシステムズアプローチへの視座

IoT，CPS など仮想世界と実世界が密に接続してよりスマートな社会を実現する上では，システムと情報の知を効果的に連結することで新しいシステムズアプローチを探ることが求められている。ここではこれに向けて筆者の問題意識としていくつかの視点を提示したい。

4.1 モデル

システム科学・工学の特徴の一つとして「モデル」の利用が挙げられる。対象の認識についてモデルを構築し，そのモデルに基づいて対象に関与する。情報分野についても情報のモデル化はやはり重要な事項である。よりスマートな世界を考えて行く上で，モデルを用いることへの自覚を改めて考える必要がある。

通常のレントゲン写真は対象物に X 線を片方からあて，対象物の向こう側に透過像を得る。複数の向きから撮影することも少なくないが，透過像だけから診断することには限界がある。より精密な診断のためには CT が用いられるが，CT 画像は「断層の像」というモデルを用い，大量の透過像から断面を数値計算により再構成することで得られるものである。すなわち「未知数」として「断層の像」というモデルをもち込んで，これを推定しよ

うとすることで初めて成立する計測法である。

今後のよりスマートな社会の創出のためには、このような発想でモデルを構成し、利用することを改めて考える必要がある。たとえば、社会システム領域を中心にエージェントベースのモデル (Agent-Based Model, ABM) の研究が進んでいる。ABM についてはモデル化の粒度について、抽象モデル、ミドルレンジモデル、ファクシミリモデルの3類型が示されており、それぞれに利用形態が異なる¹¹⁾。近年は具体的な政策の評価への応用に向けて、数量的に現実と対応が取れるファクシミリモデルの研究も多くなっている。計算機の性能向上により、シミュレーションの実行はかなり行えるようになっているが、他方で一人一人をモデル化するという ABM の構造に対して、社会調査の実施コストや調査結果としての個票利用の制限などデータの利用可能性の制約からモデルパラメータの設定が問題となる。筆者らは人口動態モデルを対象に公開されている統計から世帯構成などを拘束条件下でのランダムサンプリングと定式化して推定する手法を提唱している^{12), 13)}。オープンデータ化などが進む中で、データの利用可能性は急速に拡大しているが、利用可能なデータから直接モデルを構成できるとは限らない。さまざまなデータの利用に対応できる系統だったモデルのパラメータ推定法はより重要になると考えられる。

4.2 情報を扱うこと

情報は必要な記憶容量や処理速度など想定する点では、処理全体に対して数量的な扱いをするが、情報そのものはそれが複製でない限りはそれぞれを個別的に扱う必要がある。情報を社会的に利用しようとする社会の構成員の利害が関係してさまざまな問題に直面する。たとえば個人のプライバシーや組織の機密の保護、知的財産の適正な利用などの面での情報の流通、利用の制御や剽窃、捏造、改竄などの防止、流通した情報の適切性を維持するためのトレーサビリティ確保などである。

従来は、複製が困難であったり、伝達に制限があったり、あるいは処理に時間を要したりするなどの技術的な制約が情報の利用を自然に制限し、管理を容易にしていた面がある。しかしながら現代社会では、さまざまな情報がデジタル化されることで伝達や複製が極めて容易になり、また情報処理の高速化により大量の情報を扱えるようになった。公開鍵暗号技術の発明により、暗号通信や電子署名なども情報を保護する基盤技術として使えるようになっている。しかしながら、情報の管理、制御についてはまだまだ人手に頼らざるを得ないのが実状であり、情報の流れを効果的に制御するためのシステム技術の整備が必要である。

4.3 システムの構造

今後のシステムを考える上で社会を支えるシステムの構造は重要である。個別的なシステムは与えられた環境条件の中で技術的・経済的な合理性が模索的に追及され

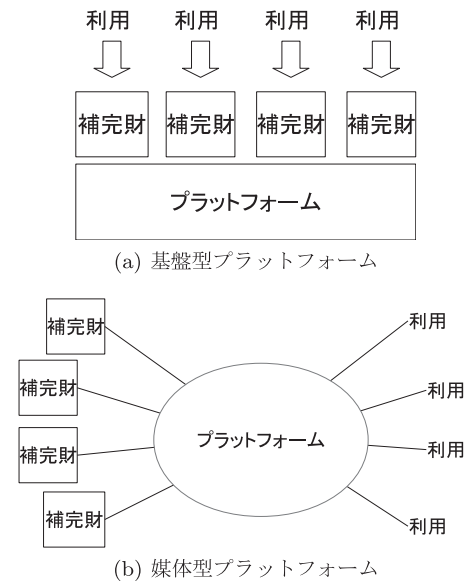


図2 プラットフォームの2つの類型

て構築されるが、それが社会全体のシステムの構造として発展するのは創発的である。この点について社会システム変容を観察しつつ、その得失を明らかにしながら必要なシステム技術を考えて行くことが求められる。

グローバル化は製造業においては世界規模でのサプライチェーンを形成しているし、それを支える情報通信システムは基盤的なものから、その上で構築される応用的なものまで階層的な構造で構成され、これが種々のサービスを産みだしている。

ここではシステムの構造の一例として第5期科学技術基本計画にもキーワードとして現れる「プラットフォーム」を挙げておきたい。出口は情報システムの階層的な構造に注目し、その産業構造としての重要性からプラットフォームという捉え方を早くから提唱している¹⁴⁾。プラットフォームの重要性は単にそれが基盤となることだけでなく、ネットワーク外部性という経済的な特性をもつことにある¹⁵⁾。ネットワーク外部性とは多くのユーザーを抱えることがユーザーにとってのメリットを増大するという性質を言う。量産によって製造コストが下がることなど「規模の経済」は供給側のコスト構造に着目したものであるが、ネットワーク外部性は需要側に同様の構造があることに注目したものである。このことからプラットフォームはより多くのユーザーを抱えることがさらなるユーザーを引き付ける一人勝ちに発展する構造をもつ。

根来はプラットフォームの捉え方として大きく「基盤型プラットフォーム」と「媒体型プラットフォーム」の2通りの類型を提唱している^{16), 17)}。図2参照。この図は根来の解説¹⁷⁾にある図を参考にプラットフォームの階層性や媒体性をより明確にするために筆者が作成した。

文献¹⁶⁾では基盤型プラットフォームとは

各種の補完製品やサービスとあわさって顧客の求

める機能を実現する基盤になる製品やサービス

としており、OS、スマートフォン、ゲーム機、iTunesなどを例示している。

情報産業以外にもライフラインは典型であり、とりわけ電力システムは電気を利用する機器(補完財)と合わさって機能するがエネルギー供給のプラットフォームとして優れている。また社会的な制度として言語、度量衡、標準なども基盤型のプラットフォームと考えられる。

もう一つの媒体型プラットフォームについては

プレイヤーグループ内やグループ間の意識的相互作用の場を提供する製品やサービス

としており、ネットオークション、インターネットコミュニティ、予約サイト、クレジットカード、電子マネーなどを挙げている¹⁶⁾。

インターネットの出現によりきわめてフラットに人々や組織がつながる社会が出現し、また事務処理など情報処理に要するコストが低下することで、従来は流通しなかった多様ながら限られたニーズをもつものの流通が可能になった¹⁸⁾。しかしながら、フラット化した状態では、膨大なニーズとシーズを互いに結合することそのものが難しい。検索エンジンはWebサイトが提供する膨大な情報源とユーザが欲する多様な情報探索ニーズを効果的に結合している。商品販売、求人・求職なども構造は類似しており媒体型プラットフォームが重要になってきている。なお媒体型プラットフォームにはその構造からニーズ側、シーズ側双方からの膨大な情報が集積しており、その集積から得られる知識の活用によりさらに付加価値を創出する構造をもつことにも留意する必要がある。

また、技術的には単にプラットフォームの構築のための技術だけではなく、プラットフォームの存在を前提に、それに適合するビジネスの在り方にも注目する必要がある。たとえば、機械部品の通販サイトとしてミスミ¹⁹⁾が知られているが、膨大な品種の機械部品などを小口販売している。中澤らは、これを支える多品種・少量・短納期の製造会社の能力構築について言及している²⁰⁾。

5. おわりに

第5期科学技術基本計画がSociety 5.0を掲げているように、社会全体を構成するためのシステム科学・工学が求められている。これは1960~70年代のアポロ計画に代表され、注目された「特定目的のシステム」の技術から、社会全体に関わる複合的なシステムのためのシステム科学・工学へと期待が大きく変化していると捉えなければならない。本稿では実世界と仮想世界がより密に結合するという流れに対して、システムの知と情報の知を改めて見返すことで、検討の糸口を探った。新しいシステムズアプローチについて引き続き考えて行きたい。

(2016年4月18日受付)

参考文献

- 1) 科学技術基本計画、閣議決定(2016/1/22)
- 2) N. Wiener(著)、池原、彌永、室賀、戸田(訳):サイバネティクス 第2版:動物と機械における制御と通信、岩波書店(1962)
- 3) 横断型基幹科学技術研究団体連合、設立趣旨<http://www.trafst.jp/aims.html>、(2016/4/9 アクセス)
- 4) 黒川敏明:大学・大学院におけるデザイン思考(Design Thinking)教育、科学技術動向、2012年9・10月号、10/23(2012)
- 5) 石田 亨(編):デザイン学概論、共立出版(2015)
- 6) 特集 システムを考える、システムで考える、計測と制御、46-4(2007)
- 7) 情報専門学科におけるカリキュラム標準 J07、情報処理学会、<https://www.ipsj.or.jp/12kyoiku/J07/J0720090407.html> (2016/4/9 アクセス)
- 8) 日本学術会議情報科学委員会情報科学技術教育分科会:報告大学教育の分野別質保証のための教育課程編成上の参照基準情報学分野(2016)
- 9) 岡部成玄:一般情報教育の全国実態調査(1)、情報処理、55-12、1400/1403(2014)
- 10) 岡部成玄:一般情報教育の全国実態調査(2)、情報処理、56-1、94/97(2015)
- 11) 高橋真吾:社会システムの研究動向3-評価・分析手法(1)-モデルの解像度と妥当性評価、計測と制御、52-7、582/587(2013)
- 12) S. Hara, H. Kita, K. Ikeda, and M. Susukita: Configuring Agents' Attributes with Simulated Annealing, in T. Murata et al. eds. Agent-Based Approaches in Economic and Social Complex Systems VII, Springer(2013)
- 13) 福田純也、喜多 一:エージェントベースの人口推計モデルにおける属性決定手法の評価、システム制御情報学会、27-7、279/289(2014)
- 14) 出口 弘:ネットワークの利得と産業構造、経営情報学会、2-1、41/61(1993)
- 15) M.L. Kats and C. Shapiro: Network Externalities, Competition, and Compatibility, *The American Economic Review*, 75-3, 424/440(1985)
- 16) 根来龍之、足代訓史:経営学におけるプラットフォーム論の系譜と今後の展望、早稲田大学 IT 戦略研究所ワーキングペーパーシリーズ、39(2011)
- 17) 根来龍之:プラットフォームビジネスとは、出井伸之監修:進化するプラットフォーム、角川インターネット講座 11、角川学術出版(2015)
- 18) クリスアンダーソン(著)、篠森(訳):ロングテール(アップデート版)、早川書房(2009)
- 19) <http://www.misumi.co.jp/index.html> (2016/4/12 アクセス)
- 20) 中澤孝夫、藤本隆宏、新宅純二郎:ものづくりの反撃、ちくま新書(2016)

[著者紹介]

喜 多 一 君 (正会員)



1959年生。87年京都大学大学院工学研究科研究指導認定退学。同年、京都大学工学部助手、東京工業大学大学院総合理工学研究科助教授、大学評価・学位授与機構教授、京都大学学術情報メディアセンター教授を経て2013年より京都大学国際高等教育院教授。工学博士、社会システム、進化計算、情報教育などの研究に従事。情報処理学会、電気学会、システム制御情報学会などの会員。