

社会インフラを支えるシステム技術

Systems Development Technology for Public Infrastructure

飯島 光一郎 福本 恭 志村 明俊

Iijima Koichiro Fukumoto Takashi Shimura Akitoshi

加藤 博光 平澤 茂樹

Kato Hiromitsu Hirasawa Shigeki

日立グループは、社会環境の変化に対応した社会インフラシステムを提供するために、変化を常態として社会全体の持続可能性を実現するシステムコンセプト「共生自律分散コンセプト」を提唱している。このコンセプトを実現するため、システムの計画、構築、運用・評価の各フェーズの要件に応えるシステム技術として、(1) ステークホルダーへの情報の流れを制御することでシステムを最適・安定にこなす「社会システムモデリング&シミュレーション技術」、(2) 社会インフラサービスを支える物理構造／事象を原理・原則としてモデル化することでサービスを止めずにシステムを再構築する「システム刷新技術」、および、(3) 所有者の異なるシステムを動的につなぎ合わせることで全体システムの最適な運用を実現する「異種システム連携技術」をそれぞれ開発している。

1. はじめに

世界的に増え続ける都市部の人口、懸念されるエネルギーや資源の枯渇などを背景に、電力・鉄道・水などの社会インフラとさまざまな生活サービスがITでつながり、「地球環境の保全」と「安全・安心・便利で豊かな都市生活」を両立させながら、成長・進化を続ける次世代都市、スマートシティの実現が望まれている。そこでは社会インフラシステムの重要性がますます高まっている。

これまでの社会インフラシステムは、あらかじめ計画したとおりに動くことを主眼につくられてきたが、今後は、災害発生などの非常時における緊急状況に対しても、自律的に、柔軟に機能し続けることが強く求められる。

ここでは、これからの時代に必要となる社会インフラを支えるシステム技術について述べる。

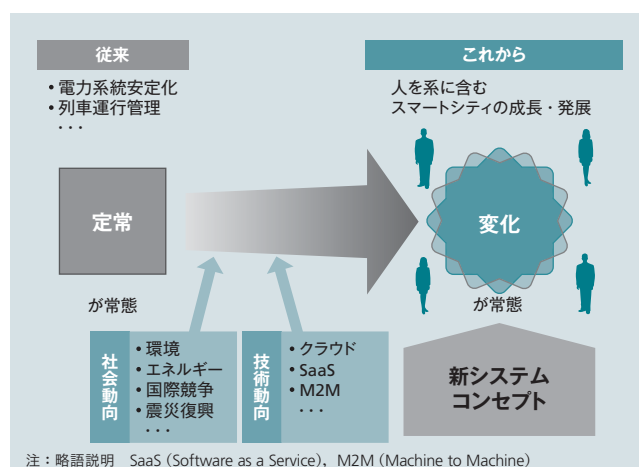
2. 社会インフラのための技術コンセプト

2.1 技術開発の狙い

生活者は個々の意思・目的を持ちながら生活し活動して

おり、その多様なニーズに応えるために、都市は急速に立ち上げられて発展することが多く、急激な社会環境の変化を引き起こす。スマートシティにおいては、この社会環境の急な変化に対しても、生活者の視点で対応できるシステムやソリューションを提供することが必要である。その実現を目標として、日立グループは社会インフラ分野の先進ユーザーとの協創によって培ってきた技術を発展、汎化させた新しいシステムコンセプトやアーキテクチャの技術開発を進めている。

これまで鉄道や電力分野で日立グループが取り組んできた列車運行管理や電力系統安定化などのシステムは、あらかじめ計画したとおりに動くことを目的としていた。新しい社会インフラのシステムは、従来のシステムを土台としながらも、多様な目的を持つ「人」をその系の中に含んでいるがゆえに、進化プロセスの中でその外部環境や構造、そして構成要素が常に変化する、つまり「変化が常態である」と定義する（図1参照）。



注：略語説明 SaaS (Software as a Service), M2M (Machine to Machine)

図1 | 社会インフラ向け技術開発のねらい

社会環境急変にも生活者視点で対応できるシステムやソリューションを提供するため、新たなシステムコンセプトをつくり出すことが求められる。

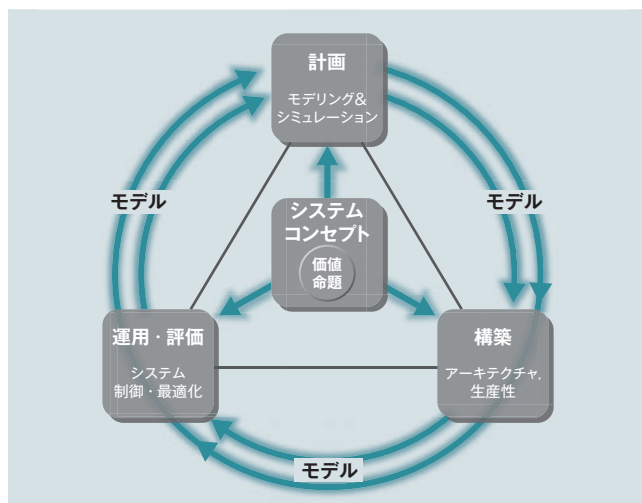


図2 システム開発技術の枠組み

「価値命題」をコアとするシステムコンセプトをすべての中心に据え、計画から構築、運用・評価までのプロセスを一貫して支える技術の体系である。

2.2 システム開発技術の枠組み

社会インフラシステムを対象とするシステム開発技術の枠組みを図2に示す。これは、「価値命題」をコアとするシステムコンセプトをすべての中心に据え、計画から構築、運用・評価までのプロセスを一貫して支える技術の体系である。この一連のプロセスは、モデルを計画から運用・評価に至る各フェーズを貫く縦糸としながら、「変化が常態である」システムを部分最適化から全体最適化に近づけるために繰り返される。

2.3 共生自律分散コンセプト

前述したような社会環境の変化に対応するために、変化を常態とすることを基本システムコンセプトとする「共生（Symbiosis）自律分散コンセプト」を提唱する（図3参照）。

生物学において共生とは、複数種の生物が相互関係を持ちながら同所的に生活する現象を指し、「寄生（Parasite）」とは異なり、互いの生物が悪影響を与えることなく、近接して生活することで互いに好影響を与え合う関係を指す。

外部環境や構造、構成要素が常に変化するインフラシステムを実現するために、上述のような生物学における考え方をヒントにしたのが、共生自律分散コンセプトである。このコンセプトにおける共生とは、異なる目的を持つ複数のシステムが、それぞれの目的遂行が可能な範囲で協調し、共存共栄が達成された状態を指す。

共生自律分散コンセプトのねらいは、従来の自律分散システム¹⁾を拡張し、システムの目的と内部および外部の環境変化に応じて、複数の自律したシステムの間で有限資源を融通し、システム全体の持続可能性を保つことにある。ここでの「資源」とは、それぞれのシステムが所有する機能であり、その機能を生み出すための人、モノ、設備

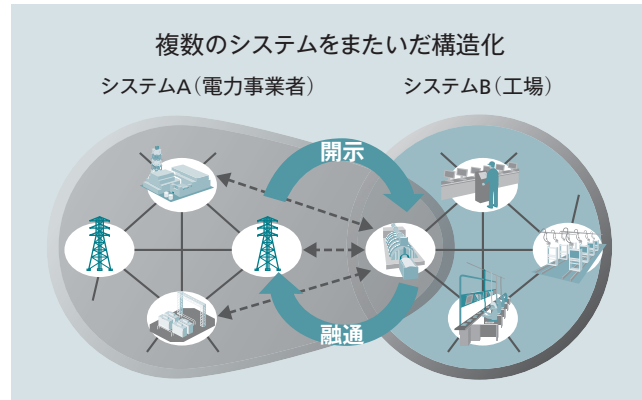


図3 共生自律分散コンセプト

複数のシステムをまたいだ構造化することによって資源を有効利用する。

なども含む。

複数システム間での資源融通を安定的に維持継続するためには、資源融通を受けるシステムが一方的に他システムから資源を取得するのではなく、資源を融通する側が自律的な判断に基づいてもととの目的を著しく損なわない範囲で融通の可否を決めることが求められる。このコンセプトではこのような関係を「開示」、「融通」関係と表し、各システムはみずから所有する資源の情報を開示し、開示を受けたシステムは資源が不足しているシステムに対して、余剰している、または利用抑制可能な範囲での融通を決定する。これは、各システムが役割を固定的とは考えず、自律しながらも相互協調的・相対的な自己構造と柔軟な役割を持つという日本的なコンセプトでもある。

こうした複数のシステムをまたいだ資源融通により、資源の利用効率向上やむだの削減が達成され、社会全体の持続可能性を保つことが可能となる。

2.4 求められるシステムの要件と開発技術

社会インフラシステムのライフサイクルは、「計画」、「構築」、「運用・評価」の三つのフェーズを繰り返すことで実行される。共生自律分散コンセプトを実現するためには、各フェーズにおける要件に応え、さまざまな社会システムを統合して扱うシステム技術と、それらを支える情報技術（IT）が必要となる（図4参照）。

計画フェーズでは、生活者、都市運営者といった多種多様な価値観を持つ複数のステークホルダーの行動やニーズを予測しながら、それぞれの課題解決に最適な都市構造や機能を計画することが求められる。構築フェーズでは、都市の成長・生活の変化などの社会環境やシステムに必要とされる機能の変化を見据えて、ライフサイクルや世代を超えた進化が可能なシステムを設計することが求められる。また、運用フェーズでは、平常時から緊急時へのスムーズな移行、新興国や異業種に横展開する際の異なる環境への

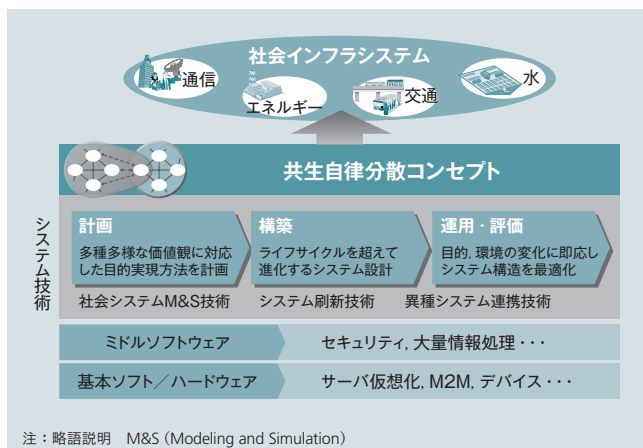


図4 | 共生自律分散を支えるシステム技術

計画、構築、運用・評価の全フェーズの要件に応えるシステム技術を開発した。

素早い対応を実現するため、目的、環境の変化に即応してシステム構造や機能の優先順位を変化させ、最適化を図ることが求められる。

日立グループは、こうした各フェーズの要件に応えるためのシステム技術として、「社会システムモデリング&シミュレーション技術」(以下、社会システムM&S技術と記す。),「システム刷新技術」,「異種システム連携技術」を開発している。これらは、システム技術の新たな潮流である、エージェントベースシミュレーションなどのミクロレベルのシミュレーション、システム工学向け記述言語SysML (Systems Modeling Language) などのシステム開発方法論、SoS (System of Systems) などのシステム構成技法²⁾にそれぞれ位置づけられる。

次に、これらシステム技術の詳細について説明する。

3. 共生自律分散を支えるシステム技術

3.1 社会システムM&S技術

システムの計画フェーズでは、生活者、都市運営者、およびこれらが利用する機器・施設(例えば、複数の生活者で共有する電気自動車など)も含めてステークホルダーと定義し、ステークホルダーの相互作用を表現する社会システムのモデルに基づきシミュレーションを行う。これにより、異なる価値観を持つ複数のステークホルダーの行動やニーズを予測しながら、それぞれの課題解決に最適な都市構造や機能を計画することを実現する。

最適な都市構造や機能を計画するうえでの重要な考慮事項は、次の2点と考えられる。一つ目は、複数のステークホルダーが存在することから多主体多目的のシステムを考えることである。おのおののステークホルダーは多様な価値観に基づき異なる評価指標を一つ、場合によっては複数保持すると考えられる。こうした状況下では何をもって最適と考えるかが重要となる。二つ目はシステムとしての安

定性の実現である。われわれが対象とするのは人が住み、生活を営む社会であり、最適化は当然、社会的にまた経済的にも安定性を保証するものでなくてはならない。生活者および都市運営者などのステークホルダーのふるまいは、機械とは異なり、一見して非常に不確実な複雑系であるため、これらのモデリングが重要となる。

このようなスマートシティをモデリングするための技術コンセプトとして、日立グループは「ハーネシング」に着目している³⁾。

ハーネシングとは、元来、馬を馬銜(はみ)や手綱でコントロールすることを意味するが、都市においては自律分散的にふるまうステークホルダーたちへの情報の流れを制御することでシステムを最適・安定にいざなうことを実現するコンセプトである。

スマートシティにおいてこのハーネシングを実現するために、以下のアプローチを行う。まず、都市のステークホルダーたちの価値観を分析し、KPI (Key Performance Indicator: 重要業績評価指標) を抽出した後、都市の「安定」、「最適」の概念を評価式として形式化する(KPI分析・抽出)。ステークホルダーに関しては、実績データを分析する、もしくはデータがない場合は仮説を用いて都市運営者や生活者の行動を期待値や分散といった形で定量化する(ステークホルダーモデリング)。最後にステークホルダーどうしの関係性を分析する(ステークホルダーインタラクション)。このようなモデリングの下、ハーネシングを都市の中でいかに実現するか、すなわち、「誰に」、「いつ」、「何」の情報を流すとシステムが有効に機能するかを、安定性と最適性と公平性の観点で評価するためにシミュレーションを実施する(図5参照)。

社会システムM&S技術を交通インフラ計画に適用した

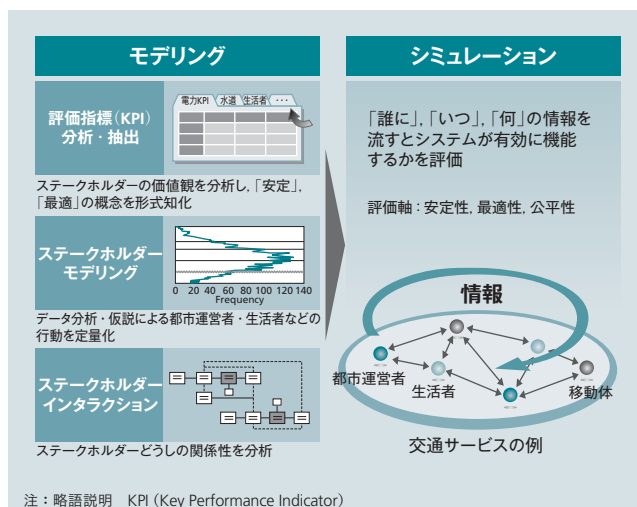


図5 | 社会システムモデリング&シミュレーション (M&S) 技術

評価指標KPI, ステークホルダー, ステークホルダー間の関係をモデリングし、シミュレーションする。

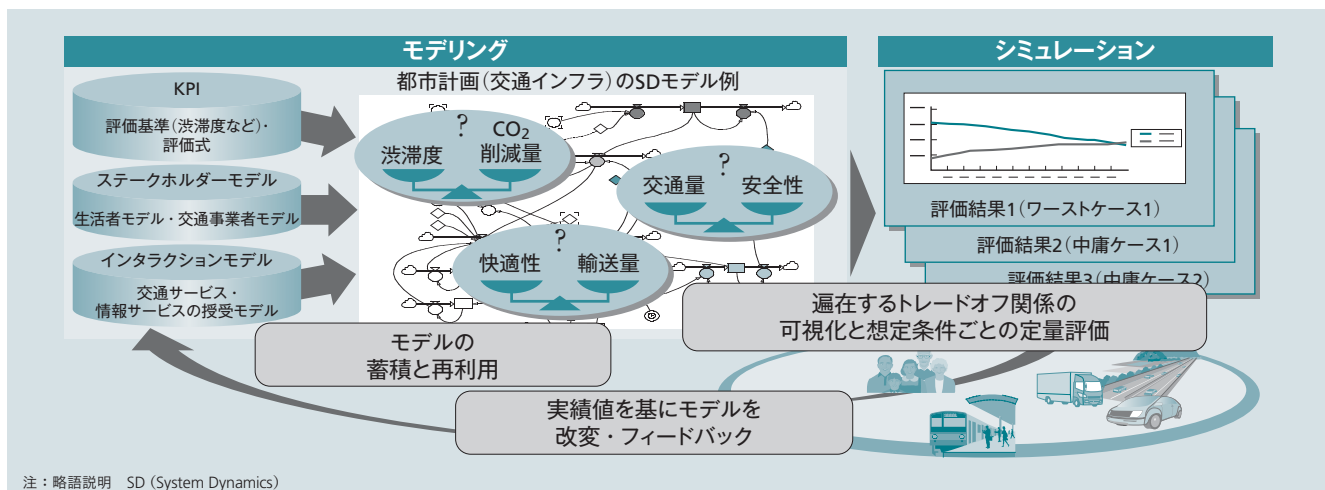


図6 | 交通インフラ計画への適用例

渋滞度などを評価指標として、生活者モデル、交通事業者モデルと、その関係をサービス授受モデルとして設定し交通インフラの計画を立案する。

例を示す(図6参照)。モデリングでは、システムダイナミクスという技法を活用する。評価指標KPIには、交通渋滞度や生活者にとっての快適性や安全性を設定する。ステークホルダーモデルには生活者モデルや交通事業者モデルを設定する。またインタラクションモデルにはステークホルダー間でのサービスの授受モデルを設定している。

上記の技法は、効果をもたらすと思われていたことが、結果的には逆効果だったといった矛盾関係の構造を評価するのに効果的な手法である。

シミュレーションでは、トレードオフの関係を可視化し、想定される条件ごとに将来の変化を定量評価することで、例えば、利用者への誘導情報の量・タイミングなどの条件を導き出す。さらに実際の交通インフラの計測実績値を基に、より実績に合ったものへ改変する。

3.2 システム刷新技術

システムの計画フェーズにおいてステークホルダーの分析や社会システムのシミュレーションが行われると、その結果に応じてシステムに要求される機能も変化していく。こうした要求機能の変化に追従し、都市の成長や生活の変化に合わせてライフサイクルを超えて安定したサービスを提供し続けることがこれからの社会インフラシステムには求められてくる。そこで日立グループは、サービスを止めずにシステムを再構築していくための生産方法をシステムの構築フェーズから綿密に考えていくことが重要であると考える、システム刷新技術を開発している。

社会インフラシステムには過去も未来も変わらず提供し続けなければならないサービスが存在している。例えば、鉄道輸送サービスでは、提供する価値は「より安全で」、「より便利」ものへと変化してきたが、「レールの上を走る車両を使って人や物資を輸送する」という物理事象はアナ

ログの時代から何も変化していない。つまり、社会インフラのサービスは、物理構造や物理事象に対して制御技術や情報技術を用いることによって、利用者にとっての価値を拡大してきたと言える(図7参照)。

日立グループは、社会インフラサービスを支える物理構造や物理事象そのものに着目し、これをシステム構築の原理・原則としてモデル化することで、サービスを止めずにシステムを刷新できるのではないかと考えた。また、これによって次に述べる異種システムとの連携の際にも、互いの原理・原則を連携させることで、ステークホルダーの判断や状況に応じたシステム構造の動的変化にも対応できるようになると考える。

システム刷新プロセスは「Reform(修復)」、「Refine(再

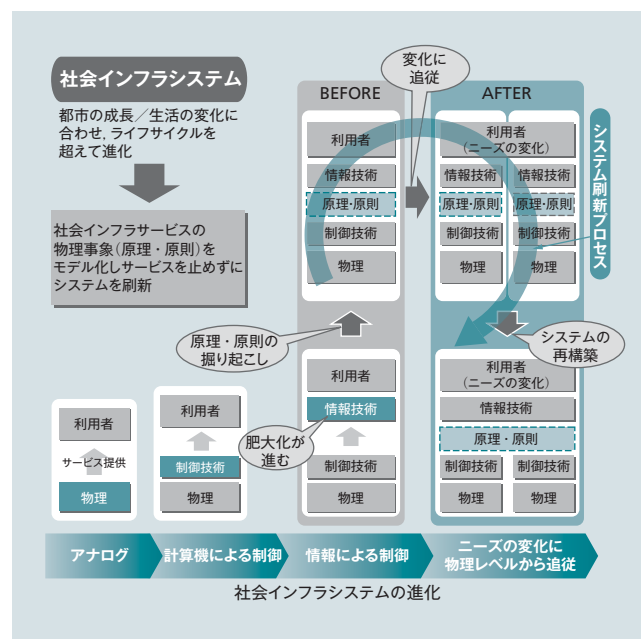


図7 | システム刷新技術

社会インフラサービスの原理・原則をモデル化することにより、サービスを止めずにシステムを刷新することが可能となる。

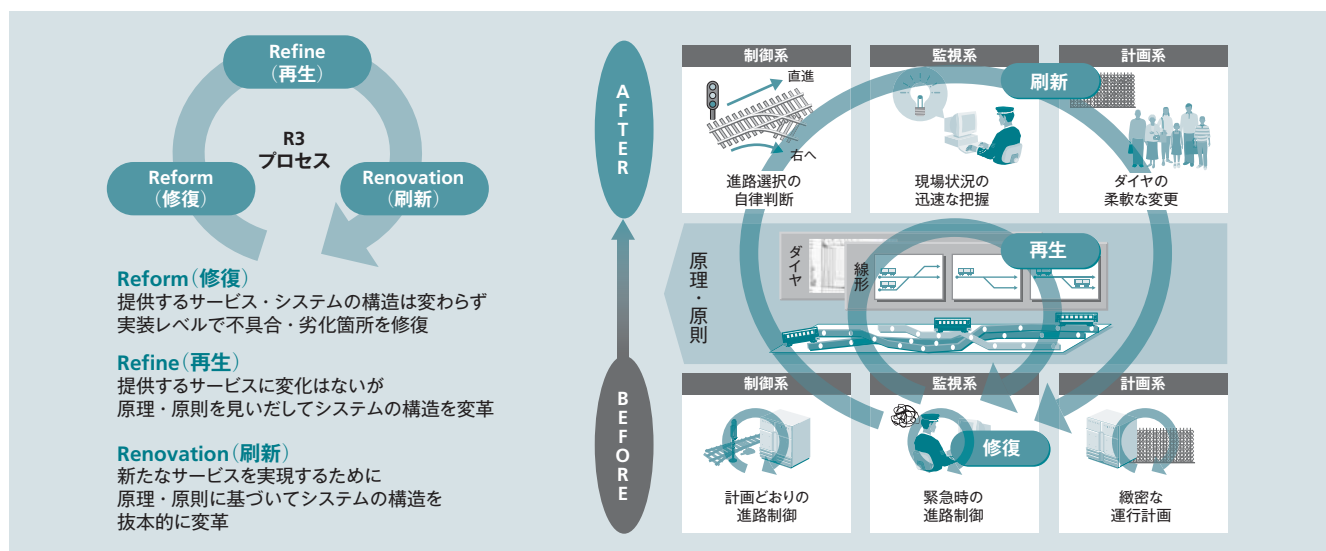


図8 R3プロセスと鉄道運行管理システムへの適用例

R3プロセスは、Reform（修復）、Refine（再生）、Renovation（刷新）の3ステップにより、システムのあるべき姿（原理・原則）を見いだし、より柔軟性の高いシステムへと刷新する。

生)」、「Renovation（刷新）」の3ステップから成り、これをR3プロセスと呼んでいる（図8参照）。Reformは原理・原則までは見いださないが、システムを「見える化」したうえで修復するステップである。RefineはReformの段階で見えるようになったシステムから、原理・原則を見だし、システムを再生するステップである。RenovationはRefineの段階で見いだせた原理・原則からあるべき姿を追求し、システムを刷新していくステップである。

これにより、例えば鉄道の運行管理システムでは、制御系・監視系・計画系に共通した原理・原則に立脚することで、緊急時の自律的な進路選択や、現場状況に即した迅速な指令業務支援、利用者の意見を取り入れたダイヤ変更など、柔軟性の高いシステムへと刷新することが可能となる。

3.3 異種システム連携技術

異種システム連携技術は、特にシステムの構築、運用・評価フェーズでの要件に応えるものであり、個別の価値判断を持つシステムが変化に応じてシステムを動的に連携させることで、システム全体での最適な運用を実現することを目的とする。

異種システムとは、異なる価値判断と判断の主体性を持ったシステムを指し、おのこの価値判断に基づいて行動を決定し、その判断に基づいたシステム連携が動的に構築される。

こうした機能を実現するため、異種システム連携アーキテクチャでは、以下の要素によってシステムが構成される。

- (1) サービス層：制御層、異種システムを含めた全体システムでの運用計画を立案、実行する。
- (2) 制御層：生産設備や輸送設備など機器の監視制御を実

行する。

- (3) 制御—サービス連携バス：制御層とサービス層をつなぎ、設備のセンサー値などの現場データと運用計画から生成された制御目標を仲介する。

- (4) 異種システム連携バス：異種のシステムをつなぎ、各システムに対して資源情報を開示する。

この構造の下、異種システム間で資源融通を実現するため、各システムは以下の動作原理を持つ。

資源融通を受けるシステムは、異種システムの制御モデルを管理・分析して、各異種システムの資源過不足を予測する。そのうえで、資源融通が可能と見込まれる異種システムに対して不足する資源とその期間を開示する。

開示を受けたシステムは、開示された資源情報から自システムへの影響を分析して資源の融通の可否とその大きさ

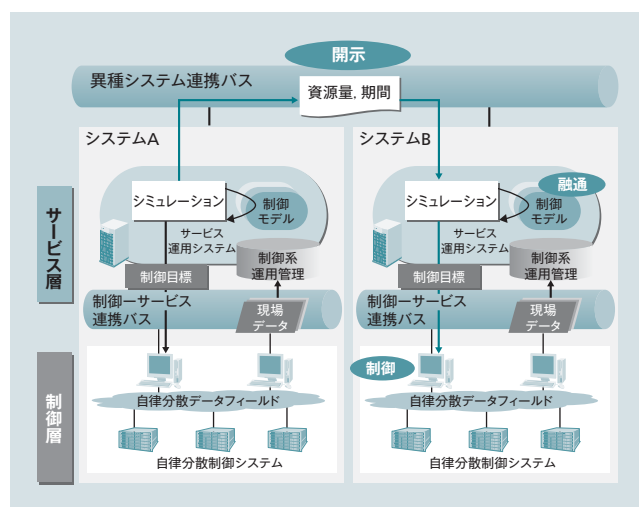


図9 異種システム連携アーキテクチャ

サービス層で、制御層や異種のシステムのモデルを管理することによって全体システムでの連携を実現する。

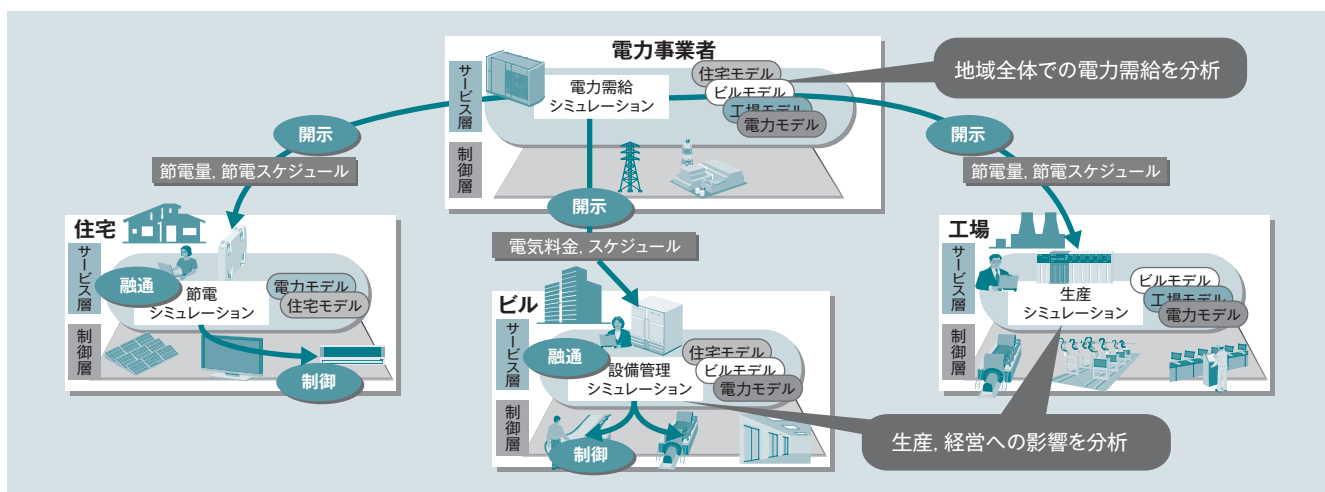


図10 | 地域電力供給への適用例

電力情報を開示することで、地域内のステークホルダー間が自律的に制御層を操作して地域内の電力需給を調整する。

を決定する。決定した資源融通を実現するため、制御の制約を考慮して制御層へ制御目標を伝え、制御層の各設備が制御目標に基づいて自律的に動作することで、資源融通を実現する（図9参照）。

異種システム連携アーキテクチャは、電力不足に対応する地域内での電力需給調整へ適用することが可能である。地域電力需給調整では、地域内のビル、工場、さらには一般生活者が協調して、自家発電や節電によって電力不足に対応する（図10参照）。

地域電力需給を担う組織（例えば、電力事業者）は、サービス層において地域内のビルや工場といった需要家の制御モデルによって地域の電力需給を分析し、地域の各需要家に対して電力情報の開示を行う。

電力が不足する場合には、工場は電力融通による生産量や収益への影響と生産設備の特性を考慮し、生産計画の調整による電力使用量削減を行うかを自律的に決定し、設備や生産ラインの制御を行う。

4. おわりに

ここでは、社会インフラを支えるシステム技術の新たな取り組みとして、社会環境の変化に対応するため、変化を常態とするということを基本とした「共生自律分散コンセプト」を提唱し、それを実現するシステム技術について述べた。

今後は、国内外のスマートシティに関する実証プロジェクトを通じてシステム技術を高度化していくとともに、柔軟性と持続性を備えた社会システムの実現に貢献していく。

最後に、本稿の内容について有益な助言をいただいた University of California, San Diego の Research Scientist Y. Agarwal 氏、および、Synergy Lab の各位に深く感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) H. Kuwahara : Experience Teach Us the Future of Autonomous Decentralized Systems, in Proc. of the International Symposium on Autonomous Decentralized Systems, Keynote Address, pp. 169-175 (1997)
- 2) 船橋：知識情報社会のシステム思考としての横断型科学技術論に向かって、電気学会論文誌C, Vol.130, No.4 (2010)
- 3) R. Axelrod, et al. : Harnessing Complexity, Simon and Schuster (2000)

執筆者紹介



飯島 光一郎

2004年日立製作所入社、横浜研究所 社会インフラシステム研究部所属
現在、スマートシティを対象としたシステムアーキテクチャの研究開発に従事



福本 恭

1994年日立製作所入社、横浜研究所 社会インフラシステム研究部所属
現在、社会インフラのシステム計画・制御の研究開発に従事
博士（情報科学）
電気学会会員



志村 明俊

2000年日立製作所入社、横浜研究所 社会インフラシステム研究部所属
現在、鉄道システムを対象としたシステム生産性の研究開発に従事
博士（工学）
計測自動制御学会会員



加藤 博光

1995年日立製作所入社、横浜研究所 社会インフラシステム研究部所属
現在、鉄道を中心とした情報制御システムの研究開発に従事
博士（工学）
IEEE会員、計測自動制御学会会員、情報処理学会会員



平澤 茂樹

1988年日立製作所入社、スマートシティ事業統括本部 都市プランニングセンタ 所属
現在、スマートシティのプランニング、スマートシティを支えるシステムの事業推進に従事
情報処理学会会員