

# システム思考で拓く、これからのインフラ政策 ～多様な社会的課題への新たなアプローチ～



技術・調達  
政策グループ  
総括（研究主幹）  
**早川 潤**



技術・調達  
政策グループ  
上席主任研究員  
**福田 健**



技術・調達  
政策グループ  
主席研究員  
**福田 勝仁**



技術・調達  
政策グループ  
研究員  
**亀山 武士**



技術・調達  
政策グループ  
研究員  
**野田 祥**

## 1 はじめに

社会経済情勢の変化に伴う労働者減少を背景とした建設の省人化に加え、カーボンニュートラル・ネイチャーポジティブなど、インフラに対する要求が多様多様化している。これらの多様な要求に対応することが求められるインフラ政策を立案し、実行していくためには、対象とするインフラ全体を大きなシステムと捉えて俯瞰し、システム内の各種施策の相互関係・関係者の相互関係も理解する「システム思考」が有効である。また、これまではベテラン技術者の「暗黙知」や現場の「阿吽の呼吸」でシステム全体を統合・調整できていたと考えられる。しかし、技術継承が困難になり、プロジェクトが巨大化・複雑化した現在、個人の能力に依存した調整は限界を迎えており、形式知化された手法が必要不可欠になっている。

本稿では、JICE 自主研究「次世代デジタル建設マネジメント研究会」で研究中のシステム思考および形式知化された手法の一つであるシステムズエンジニアリングについて紹介するとともにインフラ政策への提供可能性について提案する。

## 2 システム思考

### 2.1 システムとは？

システムときくとコンピュータシステムを思い浮かべるかもしれない。ここで言うシステムとは「一つ以上の明記された目的を達成するために組織された相互に作用する要素の組み合わせ」と JISX0170: 2020 (ISO/IEC/IEEE 15288: 2015) で定義される。

### 2.2 システム思考

近年では多様で複雑に絡み合う課題を解決するため、対象をシステムととらえて分析するシステム思考が注目されている。

#### （１）システム思考とは？

システム思考は、現実の複雑性を理解し、望ましい変化を起こすために、物事のつながりや全体像を見て、目に見えている問題だけでなく背後にある構造や要素同士の相互関係に目を向けて、本質的な解決を目指す思考方法である。

このシステム思考は、持続可能な社会の実現にむけた重要なスキルとして注目されている。世界経済フォーラムでは、「将来求めるスキル」の一つとしてシステム思考が挙げられており2030年に向けてその重要性がますます高まるとされている。

システム思考の全体像は大きな冰山を使って説明される（図1）。実際に発生する目に見える「できごと」は全体のほんの一部であり、海面下に目には見えない全体像が存在する。「できごと」は、その背景にある「パターン」から生じるものであり、そのパターンは「構造」によって生み出され、その構造は関与する人々の「メンタルモデル」で作られている。

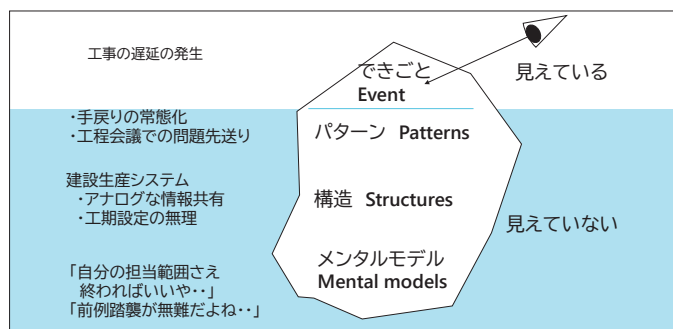


図1 システム思考の全体像（冰山モデル）

#### （２）ロジカル思考との違い

それでは、ロジカル思考（ロジカルシンキング）と何が違う

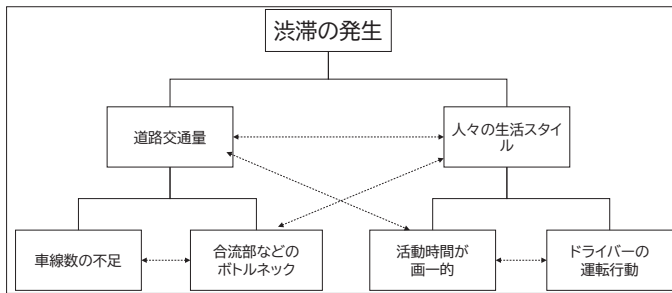


図2 ロジックツリーとシステム思考で補う視点（破線矢印）

のだろうか。ロジカル思考は、分析対象をより小さな単位に分解することで理解を深める要素分解型の思考技法である。それを可視化したのが図2に示すロジックツリーである。取り扱う対象が単純で答えが一つに決まっている場合、線形型のロジカル思考が適している。

ただし、ロジカル思考（図2の実線）の場合、破線矢印で示されるような、目に見えない要素の繋がりを関連づけ問題の本質にたどり着こうとする視点が不足する可能性がある。また、ロジカル思考技法はものごとを静的にとらえるため、各要素の時間経過による変化、要素間の相互作用という動的な視点が抜けやすい。

ロジカル思考は症状と病巣に直接対処する西洋医学、システム思考は症状や病巣を生み出す周辺の要因にも目を向ける全体に対処するアプローチの東洋医学に例えられることもある。

### （3）因果ループ図

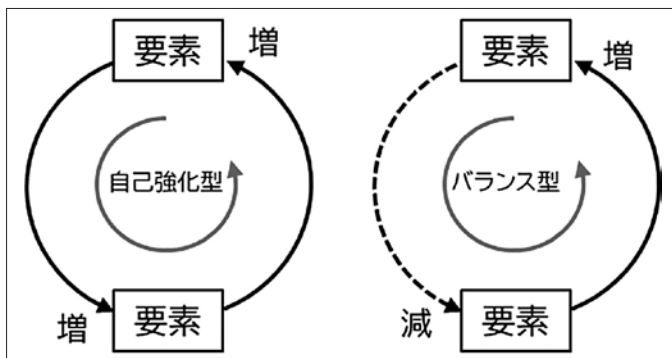


図3 自己強化型ループとバランス型ループ

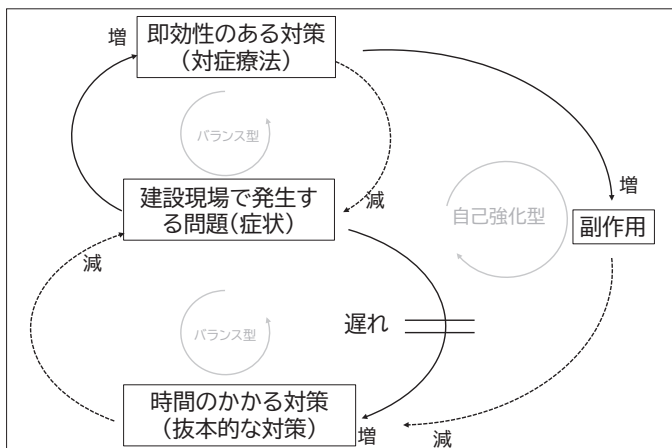


図4 マルチループシステム

システム思考では因果ループ図という図式分析ツールが使用される。システム要素間の因果を共変性、時間的先行性などを条件に整理する。因果ループ図には図3に示す自己強化型ループとバランス型ループがある。自己強化型はシステムのループによって次第に拡大へと向かわせるループである。正と負のスパイラルループのイメージである。一方、バランス型はシステムを次第に収束へと向かわせるループである。縮小と拡大の組み合わせで安定しているイメージである。これらのループを複数組み合わせると図4に示すマルチループシステムが構築できる。

### 2.3 システム思考の例

平成25年に国土交通省が設立した「発注者責任を果たすための今後の建設生産・管理システムのあり方に関する懇談会」（以下「発注懇」）は、発注者の視点から今後の建設生産・管理システムのあり方及び諸課題への対応方針についての検討・提言を行うことにより、社会資本の整備及び維持管理・更新を適切に実施し、将来にわたって安全なインフラサービスを継続的に提供するシステムを構築することを目的としている。このように発注懇では、建設生産・管理を一つのシステムとしてとらえており、システム思考とも親和性が高いと考えられる。

建設生産・管理システムで発生する問題を根本的に解決するためには、全体をシステムとしてとらえ、根本的な対策が必要である。JICEが研究対象とする建設生産人口の減少への対応、生産性の向上等にはこの視点が不可欠である。

インフラ分野の課題解決にあたり、即効性の高い対策も求められるが、その結果として根本的な対策を阻害する副作用も発生していないかどうか全体要素の組み合わせをよく理解する重要性が図4から理解できる。そして、それを実行する人たちのメンタルモデルも理解しながら、インフラ政策を検討する必要がある。このように、システム思考により、部分最適の罠に陥らず、全体として機能するシステムになっているか確認することが重要であると考えられる。

なお、JICEレポート本号の「人材育成とDX推進の構造的な分析と政策提案」において、システム思考による因果ループ図を作成し、中小建設業の人材育成とDX推進について分析しているので、あわせてお読みいただきたい。

## 3 システムズエンジニアリング

次にシステム思考の実践・応用の一つであるシステムズエンジニアリング（Systems Engineering）を紹介する。

### 3.1 製造業で発生している問題

今日の我々の社会はスマートフォンやパソコンから自動車、航空機、人工衛星に至るまで、あらゆるものがハードウェアとソフトウェアが複雑に組み合わせられたシステムで成り立っている。製造業ではこのシステムにより全体の機能を発現させる製品・サービスを提供している。従来は製造全体の統合的な知識

を暗黙知として持ったベテラン技術者が全体俯瞰と細部の集中のバランスを取ることで品質を維持してきたが、昨今では製品の複雑化、ベテラン技術者の減少により、従来の手法では限界が生じている。このため、大規模な開発プロジェクトの失敗や複雑な製品開発での手戻りの悪循環が発生している。

このようなシステムを取り扱う業界では、システムズエンジニアリングの重要性が強調されるようになってきている。

3.2 システムズエンジニアリングとは？

(1) システムズエンジニアリングの定義

システムズエンジニアリングは、「利害関係者のニーズ、期待及び制約の集合を、解決するソリューションへ変換するため、及びソリューションが用いられる全期間を通じて、それを支援するために要求される、技術上及び管理上の作業の全体を統括するような、複数の専門分野を横断した取組方法」と JISX0170: 2020 (ISO/IEC/IEEE 15288 : 2015) で定義される。

従来の文書ベースのシステムズエンジニアリングでは専門分野を横断して構築される複雑なシステムを扱うことが困難になってきたことから、この課題を克服するものとして MBSE (モデルベース・システムズ・エンジニアリング) が期待されている。文書中心のアプローチに対して、後述する V モデルや SysML ダイアグラムを活用し、大規模モデルやシミュレーションなどに対応可能にしたものが MBSE である。これにより、「パラバラの膨大な文書の山」から脱却し、「同じ一つの地図 (モデル)」を見て議論することが可能となる。

(2) V モデル

図 5 は、この V モデルを近年の「流域治水」政策に当てはめたものである。最上位の「気候変動への適応」という要求から、「流域」「河川区域」「個別の対策 (遊水地など)」へと階層構造 (分解) を整理し、右側でそれぞれの効果を検証・統合していくプロセスが見て取れる。

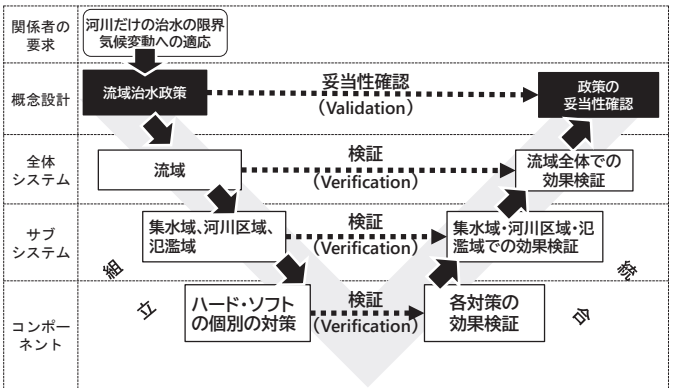


図5 Vモデル

(3) V&V (Validation & Verification)

Vモデルに用いられる「妥当性確認」と「検証」の違いも重要である。妥当性確認 (Validation) と検証 (Verification)

はあわせて「V&V」と呼ばれる。図6はこのV&Vを橋梁整備にあてはめたものである。

妥当性確認は関係者の要求に合った「正しいシステムが作られているか」という目的の確からしさを保証し、検証は仕様書どおり「正しくシステムが作られているか」という手段の確からしさを保証することである。

この2つの違いはとても重要で、各施策が政策どおり正しく作られていても、政策そのものが関係者の要求と乖離していたら、その政策は正しくないことになる。不安定・不確実・複雑・曖昧 (VUCA) で、関係者の要求変化が激しい現代には特に V&V によるレビューが重要である。

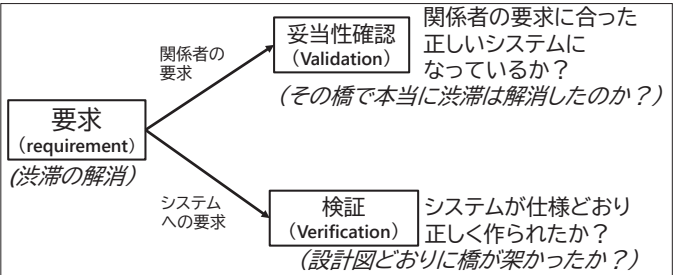


図6 V&V : 妥当性確認 (Validation) と検証 (Verification)

(4) SysML ダイアグラム

SysML は多様な要素の組合せから構成されるシステムを表現するための図的モデリング言語である。SysML は要求、構造、振る舞いなどの具体的・抽象的な要素を一緒にモデル化することが可能である。

3.3 他産業の事例

自主研究で明らかになった他産業の事例を紹介する。

(1) 自動車

自動車の従来の開発手法は、前製品と開発製品の「差分開発」が主流であり、これが革新的な製品創出の阻害や、長時間労働と労働生産性 (付加価値) 低下の原因となっている。

マツダでは、従来エンジン機種ごとの適合 (調整) 作業に多大なリソースを要していたが、SKYACTIV の開発では、システムズエンジニアリングを導入し、システム設計により機種ごとの適合を不要にし、妥当性確認と検証のコストを大幅に削減した。現在、ホンダ・トヨタでも MBSE への取り組みが始まっている。

近年の傾向として、AD (自動運転) や ADAS (先進運転支援システム) などの新領域開発 (主に制御) に対し、SysML を用いた MBSE の適用が進んでいる。未経験の領域であるため、グローバル標準の共通言語を用い、多くの関係者によるレビューと調整が不可欠であることが、MBSE の導入を後押ししている。

(2) 宇宙衛星

現代の宇宙衛星プロジェクトは、複雑さや不確実性を制御し



きれず、成功の定義も曖昧になりがちであり、その結果として開発漏れや手戻りが発生している。実際、過去のNASAの事例でも、上流設計への投資が10%未満だった際に、40%以上のコスト超過が発生したというデータがある。これらの失敗や課題は、各システムの担当範囲が不明確であり、目的や機能といった横断的な視点で衛星システム全体を捉えることが不足していたことに起因すると考えられる。

この複雑な課題を解決するため、「ちょうどいい抽象度」と「複数の視点」を用いてシステムを横断的に可視化するMBSEの活用が進んでいる。システム構造の可視化により、より良い意思決定を行うことが可能となった。

### (3) ロボット安全の場合

農機ロボットの自動運転や無人運用においては、農道や水路の状況に起因する転落リスクなど、検討すべきリスクシナリオが膨大化し、その管理が困難となっていた。加えて、製品設計（プロダクト層）は企業戦略の影響を強く受けるため、階層間の要求の差異により、達成すべき安全基準が曖昧になるという課題も抱えていた。そこで、これらの複雑な情報の構造化と、一元管理を目的にMBSEを導入した。その結果、リスク対策の全体構造が可視化され、状況に応じた対策の変更や調整が容易となった。特筆すべき事項は、モデル上でメーカーやユーザーの役割（Responsible for）を定義した点である。これにより、具体的な作業場面における責任の所在が特定され、MBSEがステークホルダー間の円滑なリスクコミュニケーションを促進する有効なツールであることが実証された。

### (4) 次世代エアモビリティ

従来の航空機の機体認証では、実験ベースのデータや検証方法しか認められていない。また、想定外の原因で事故が起きた場合のトレーサビリティを確保する仕組みも不可欠であり、こうした背景がMBSE適用への原動力となっている。例えば、機体設計の中でも特にCFRP（炭素繊維強化プラスチック）は破壊モードが多く、高度な証明が必要となるが、現在、仮想試験（Virtual Testing）によって材料の複雑な挙動を再現する試みが行われている。これは高精度なシミュレーションにとどまらず、それを位置づけるMBSEの重要性を背景とした取り組みであり、解析による証明（CbA（Certificate by Analysis））で従来手法（実験ベース）を代替する方法が議論されている。

## 3.4 建設業におけるシステムズエンジニアリング活用への期待

本研究会で得られた建設業におけるシステムズエンジニアリング活用への期待を一部紹介する。

- 設計・施工分離による非効率な情報伝達を認識した上で、自動車業界のように「制約を起点にした設計の工夫」が応用可能ではないか。異種データを接続可能にするための要件定義がその答えになる。
- 欧米中心で発展してきた既存のシステムズエンジニアリ

ングやMBSEが必ずしも日本に適しているわけではない。日本の建設事情に適した日本ならではの手法を見出し、成果を挙げ、広く普及させていくことが重要。

- 都市やインフラをシステムとして捉えることが、一見関係のない様々な問題の解決策を見出すことに繋がるかもしれない。

## 4 インフラ政策への実装の可能性

近年のインフラ政策は、社会や環境の急激な変化に対応し、多様な関係者の要求を踏まえたハード・ソフトの融合による課題解決が求められている。一方で、労働人口の減少や業務時間の制約が進む中、年々肥大化する政策関連文書に依存した従来の手法で、人間が複雑な政策の全体像を正確に把握し続けることは困難になりつつある。

こうした状況下において、AI等のデジタル技術が進化する時代だからこそ政策立案者に不可欠なのが「システム思考」である。単に可視化された問題（できごと）への対処にとどまらず、問題を発生させる潜在的な構造や、関係者のメンタルモデルまでを深く洞察する姿勢が重要となるからである。

システムズエンジニアリングは製造業特有の手法と捉えられがちである（読者のメンタルモデル）。しかし、本稿の図5（流域治水）や図6（橋梁整備）で示したように、インフラ政策の構造化と課題解決にも親和性が高い。既存の固定観念にとらわれず、政策立案の共通言語としてこれらのモデルを活用していく姿勢が求められる。

本自主研究では、ケーススタディの蓄積を通じて当財団の政策立案・補完能力を高めると共に、他産業の知見を活かしたデジタル時代のインフラシステムの全体最適化や生産性向上について、引き続き提言を行っていく。

### 参考文献

- 1) イラスト版システム思考,クマヒラセキュリティ財団,2025.
- 2) The Future of Jobs Report 2025, World Economic Forum, 2025.
- 3) 湊宣明:『[実践] システム・シンキング』,講談社, 2016.
- 4) 早川潤, 松橋雅彦, 堀田昌英: システムズエンジニアリングを適用した社会基盤システムの一考察, 第43回建設マネジメント問題に関する研究発表・討論会講演集, 2025.