

社会基盤施設の公理的設計とガバナンスの関係に関する一考察 *

On Axiomatic Design for Infrastructure and Governance*

横松宗太**

by Muneta YOKOMATSU**

1. はじめに

「設計学」は、工業製品等を「設計」する活動自体を科学的プロセスとして捉え、望ましい設計解を導出するための基礎的な原理や方法論について分析する学問分野である。設計学では設計を経験と直観がなす芸術とは捉えない。設計学は、設計の科学的基盤を確立させたうえで「必ずうまくいく」というプロセスを提供することを目的としている。そのためには「良い設計」を選ぶ基準が必要となる。N.P.Suhらは「独立公理」と「情報公理」と称する2つの設計公理を導入し、両者を満たしながら設計変数を選択することが最適な設計活動であると唱えた。N.P.Suhや日本で設計学をリードする畑村らのグループは一般の工業製品を設計の対象としている。本稿では、インフラストラクチャーの設計に対してN.P.Suhの「公理的設計論」が如何に適用されるかについて検討する。インフラストラクチャーの設計が一般的な工業製品の設計とは本質的に異なる側面と、公理的設計論の考え方が適合する側面とを整理する。

2. 公理的設計論

(1) 設計方程式と設計行列

公理的設計論においては、設計の世界は顧客領域(customer domain, CA)、機能領域(functional domain, FR)、実体領域(physical domain, DP)、プロセス領域(process domain, PV)の4つの領域により構成されている。4領域はCA→FR→DP→PVの階層関係を形成している。そして「設計」は上位の領域から下位の領域への写像として捉えられる。すなわち設計行為は上位の決定を所与として下位の要素

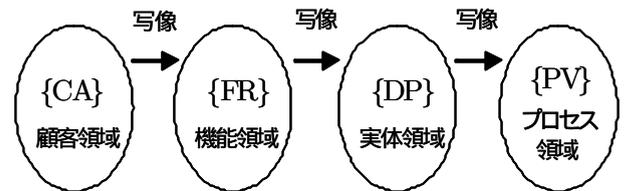


図-1. 領域間の写像としての設計
(出典：Suh(2001))

を特定していく作業に相当する。その中でも工業製品の設計において中心となるのが、要求機能(FR)と制約条件(C)を与件として実体領域における設計解(DP)を決定するプロセスである。その基本的関係は以下の設計方程式(design equation)で表される。

$$\{FR\} = [A]\{DP\} \quad (1)$$

予算制約は制約条件(C)に含まれる。要求機能が複数ある場合、{FR}はベクトルになる。[A]は製品設計を特徴づける設計行列(design matrix)と呼ばれる。要求機能が2個である場合、設計方程式は次式のように与えられる。

$$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

設計行列[A]が対角行列の場合を独立設計(uncoupled design)、三角の場合を準独立設計(decoupled design)、その他の形式の設計行列の場合を干渉設計(coupled design)と呼ぶ。独立設計では、以下のように、ひとつの機能がひとつの物的設計変数のみで満足されることになる。

$$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 \\ 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

実体領域からプロセス領域への写像も同様に以下の設計方程式で表される。

$$\{DP\} = [A]\{PV\} \quad (4)$$

*キーワード: 社会基盤施設, ガバナンス, 公理的設計, 長期性

**正員 鳥取大学工学部社会開発システム工学科
(〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101 TEL/FAX 0857-31-5311)

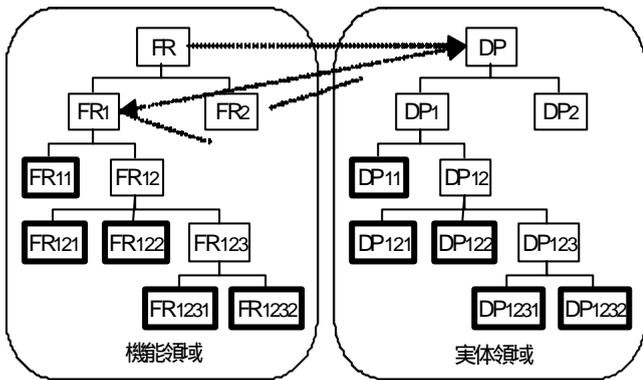


図-2. 階層構造とジグザグ思考 (出典: Suh(2001))

(2) 独立公理と情報公理

設計の公理的アプローチにおける基本的な仮説は「設計プロセスを統治する根本的な公理が存在する」ということである。それらは以下の二つの公理に集約される。

独立公理：要求機能 (FR) の独立性を保て。

情報公理：設計の情報量を最小化せよ。

要求機能 (FR) は設計目標を記述する最小個数の独立した必要条件として設定されなければならない。また情報公理は独立公理を満たす設計の中で、最小の情報量をもつものを最良の設計と位置づける。ここでの「情報」はある課題を達成するために必要な知識の量であり、課題の複雑さの程度を意味する。従って情報公理は「成功確率を最大にする設計を選択せよ」と等価である。以上の二つの公理から多くの定理や系が導かれる。理想設計 (ideal design) では DP と FR の数が等しく、FR は常に互いに独立である。一方、FR の数 > DP の数の場合には干渉設計となり、FR の数 < DP の数の場合には冗長設計 (redundant design) となる。公理的設計論では設計は常に理想設計である独立設計を目指す。

(3) 階層構造とジグザグ思考

公理的設計論の特徴の一つに、FR や DP を徹底的に階層に分解する作業がある。図-2. は階層化のイメージを示す。第 1 レベルの FR は設計の意図を示す。設計の意図に対して基本的な DP が決まる。そして第 2 レベルの FR を決定する際には、第 1 レベルの設計方程式と矛盾してはいけない。すなわち第 1 レベルで独立設計を満たす設計方程式が書かれた場合、図-2. における第 2 レベルの DP₁₁ は FR₂ に影響して

はならない。Suh(2001) を参照して冷蔵庫の設計を例にあげよう。まず第 1 レベルにおいて、FR₁ = 「長期保存には食品を冷凍する」、FR₂ = 「短期保存には食品を冷蔵する」という 2 つの FR に対して、DP₁ = 冷凍室、DP₂ = 冷蔵室が設計されるとする。すると第 2 レベルでは FR₁ が分解されて FR₁₁ = 「冷凍庫の温度を -18°C ± 2°C の範囲に制御する」、FR₁₂ = 「冷凍庫全体を一様にあらかじめ設定した温度に保つ」、FR₁₃ = 「冷凍庫の…」、FR₂₁ = 「冷蔵庫の温度を 2~3°C の範囲に制御する」、FR₂₂ = 「冷蔵庫の…」のように設計される。公理的設計では領域間のジグザグ (zigzagging) の思考領域が不可欠であり、この動きを通して各領域に階層が作成される。

3. インフラ設計に固有の問題

(1) インフラ設計問題の焦点と情報公理

本章よりインフラストラクチャーの設計問題に対して、公理的設計の考え方を如何に応用・拡張していけばよいかを考えたい。インフラは大規模な外部経済性、利用者の不特定性、利用形態の多様性、ネットワーク性、供用期間の長期性などの特徴を有している。インフラ設計問題では、以下の 2 つの問題が企業における製品設計問題と異なる質をもつように思われる。

- 1) 要求機能 FR を決定する問題。
- 2) 施設の設計、施工を発注する問題。

インフラ設計問題では、要求機能 FR を決定する問題と物理的組成としての設計解 DP を決定する問題が、それぞれ政府と民間企業によって個別に解かれることになる。両主体の間にはインセンティブや情報の非対称性が存在する。要求機能 FR が決定した後の 2) のステージにおいて、FR が計画通り達成されるか否かの不確実性に関しては、いわゆるヒューマンエラーの可能性のみならず、契約設計の失敗のリスクが介在する。すなわち情報公理の要求には民間主体のインセンティブの適切な誘導も含まれる。効果的な会計情報の整備等も関連する。情報公理は施設の物理的設計と契約設計の双方を対象とする。

本来、ガバナンスの議論の中心は 2) のステージにあるだろう。しかし本研究では最終的にインフラの設計プロセスを体系化することを目的としている。

よって本稿では、まずはより上位の問題である1)を検討する際の留意点について整理していきたい。

(2) インフラの要求機能

インフラの要求機能の決定は社会計画者や土木計画学の最も重要な仕事のひとつと言える。インフラの要求機能が適切に決められない限り、実体領域(DP)とプロセス領域(PV)を担う技術者の技能が不毛な場所で発揮されることになる。

本稿ではインフラの要求機能の決定問題について、「インフラの要求機能はできる限り単純で少数であるべきである」という直観的な仮説を設けよう。以下に取り上げる着眼点の幾つかはその仮説を支持する要因となりえるものである。

(3) 潜在能力の視点からの公共性

Sen(1985)の視点からすれば、公理的設計論の設計方程式は「機能」の意味をいささか矮小化しすぎているかもしれない。Sen(1985)は「財の所有」すなわち「財が備える諸特性への権限」と、「機能(functionings)」すなわち「人が成就しえること」を明確に区別している。そのような観点からすれば、道路や橋脚などの物的インフラの供給は「財の所有」に含まれる。個々人による自動車の所有や運転技術の獲得を伴って、はじめて「輸送性」という機能が実現する。インフラ整備は機能ベクトルを生み出すための中間的な段階にすぎない。

個人の利用関数の集合は様々である。インフラは、できるだけ多くの個人がその特性を利用できる能力をもつ財であることが望ましい。利用の目的も個人間で様々である。道路であれば、運送業の経済活動に利用されることも、ドライブの効用に寄与することも要求される。インフラは機能の高度化によって用途が限定されてはならない。

(4) 計画者と利用者間のジグザグ思考

Axelrod(1999)は複雑適応系の成功事例としてOSのリナックスをあげている。リナックスの開発手法は「オープンソース・ソフトウェア開発」と呼ばれている。リナックスは世界中のユーザーに無償で提供され、世界中に散らばる膨大な数のボランティア・グループの貢献によって進化を続けてきた。リナック

スのOSは、政府により供給されてはいないものの、公共財の性格を備えたインフラである。一方、政府が供給するインフラにもオープンソース環境において、利用されながら機能が発展してきたものもある。単なる広場が利用者によって会合や市場取引、祭事の場所となっていく例などもそれに該当する。利用形態の方向が定まり始めてから、政府がより具体的な施設を追加整備してもよい。このようなケースは、計画者である政府と利用者との間で長い時間をかけてジグザグ思考を展開しながらインフラの機能を決定していると解釈することもできる。

換言すると、既存のインフラについてもその潜在的役割の全てが発現したわけではない。インフラの超長期的な投資効果を評価することは困難である。

(5) 予測不可能性とバッファとしての役割

小林(1999)は「社会経済・システムの予測不可能性は、システムの制御不可能性、計画不可能性を意味するのだろうか?」という問いを提示した上で、インフラのバッファ・システムとしての役割を指摘している。交通・通信システムは単に生産過程に投入される道具ではない。耐用性によって長期間にわたって社会の安定性と確実性をつくりあげるのと同時に、種類のゲームを演じるためのフレキシビリティの高い場を形成している。

インフラの耐用性やインフラ投資の不可逆性は、民間主体に長期的な見通しを可能にさせ、それに基づいた投資を実行させる効果をもっている。またインフラがバッファ・システムないしセイフティーネットとして機能していることによって、民間主体がリスクの大きな挑戦に乗り出すことが可能となる。従って、セイフティーネットは決して切れてはならない。バッファ・システムの設計に際しては情報公理に絶対的な基準を設ける必要があるかもしれない。

(6) 独立公理の意義

公理的設計論において、二つの設計公理はあくまで公理であって、必要性が科学的に証明された概念ではない。Suh(1990)は設計公理が発見されるまでの経緯を綴っているが、要は二つの設計公理がSuhらが調べた全ての成功した設計の共通要素として確認されたという経験によって裏付けているに過ぎな

い。

ここで独立公理の意義を再考してみよう。インフラ設計問題において、独立公理はインフラの長期的供用を補助する役割を果たしている。例えば施設の一つのパーツの維持補修の際に、設計が干渉していれば、複数の機能を停止してしまう。例えば道路舗装と道路の下の埋設管は干渉設計になっており、埋設官のメンテナンスの際には道路交通は停止する。また、複数のFRをもつインフラにおいて一つのFRのみが時代遅れとなったとき、独立設計が満たされていれば他のFRに影響しないかたちでそのFRのみ撤去ないし更新することが可能となる。先述のように、インフラのFRは極力、時代遅れとならない、普遍的な機能を選択することが望ましい。しかし独立公理と独立設計を満足していれば、機能の撤回によるロスを部分的に緩和することができるだろう。

その一方、上記のSuh(1990)には反するが、例えば「環境にもよい素材」や正の技術的外部経済性をもつ機能など、積極的に干渉させるような設計方針は決してありえないのかどうか、今一度検討する必要がある。

4. おわりに

本稿では公理的設計理論のインフラ設計問題への適用可能性について検討した。インフラを設計する場合、なによりまずインフラの要求機能を決定する必要がある。本稿ではその際の留意すべき要素について提示した。

インフラの長期性はインフラ設計問題に多くの特殊性をもたらす。新しいインフラが社会のハードウェアとして完全に機能するようになるまでには長い時間を要する。しかし、一度それが新しいハードウェアとして機能し始めると、無限の多様性をもつ新しい行動様式を生み出し、社会・経済の構造的な変化を引き起こすことになる。インフラ整備の短期的な経済効果に関しては、費用便益分析技術の発展等を通じてかなりの程度把握できるようになってきた。一方、超長期的な視野による評価は究極的には不可能といってよい。しかし社会はインフラの長期的な価値やその構造を定性的にでも把握する必要がある。社会がインフラストラクチャー投資に対するインセンティブをもつためには、まずはインフラストラク

チャーの本質を理解し、その重要性と役割を認識することが不可欠である。

公理的設計アプローチで定式化される設計問題は、日本版PFIの中で性能発注方式をどのように定式化していくかという、現在直面している問題そのものであるともいえる。PFIと性能規定型発注、階層的・設計問題は三位一体の関係にある。本稿では詳述しなかったガバナンスの問題についても、本アプローチを用いて階層的に定式化することによって各主体の責任の所在が明確になるなどのメリットが発生するかもしれない。

今後は具体的なインフラ施設を取り上げて、モデルを定式化することが課題である。そして「インフラストラクチャーの設計とは何か」という問題を考えていく上で、かつ実際にインフラの設計を遂行していく上で、公理的設計アプローチが実質的な問題解決の工学的道具となるよう理解を深めていくことが目標である。

参考文献

- 1) Suh, N.P.: *The Principles of Design*, Oxford University Press, 1990. (畑村洋太郎監訳, 「設計の原理 - 創造的機械設計論 - 」, 朝倉書店, 1992.)
- 2) Suh, N.P.: *Axiomatic Design*, Oxford University Press, 2001. (中尾政之他訳, 「公理的設計」, 森北出版株式会社, 2004.)
- 3) 畑村洋太郎編著: 実際の設計, 第4巻「こうして決めた」, 日刊工業新聞社, 2002. 第5巻「こう企画した」, 日刊工業新聞社, 2004.
- 4) Sen, A.: *Commodities and Capabilities*, Elsevier Science Publishers B.V., 1985. (鈴木興太郎訳, 「福祉の経済学 - 財と潜在能力 - 」, 岩波書店, 1988.)
- 5) Axelrod, R., Cohen, M.D.: *Harnessing Complexity*, 1999. (高木晴夫監訳, 「複雑系組織論」, ダイヤモンド社, 2003.)
- 6) 小林潔司編著: 知識社会と都市の発展, 森北出版株式会社, 1999.