

機能と設計主体の階層性を考慮した 複合施設型インフラストラクチャの設計方法に関する研究

公共システム研究室 伊藤有一

1. はじめに

近年、PFI 事業に性能規定型発注が導入され、民間企業がインフラ機能の設計主体となる機会が増加している。本研究では、2つ以上の主機能または副機能を保有するインフラを複合施設型インフラストラクチャ(以下;「複合インフラ」)と定義する。主機能とはインフラの目的を果たし、副機能は主機能の欠点を補完する機能である。

設計理論の中心は、何を達成したいのかという要求機能の領域(機能領域)と、どのように達成するのかという設計パラメータの領域(実体領域)の間の写像にある。設計を行う際には、第一に、各領域において適切な階層構造を記述する必要がある。複合インフラの設計では、インフラを形成する複雑で多数の要求機能と設計パラメータを慎重に分解し、階層構造を描くことにより、機能の独立性・従属性を正確に把握することが重要な作業となる。

階層構造のなかでサブシステムを捉えたあとには、各サブシステムの設計をモジュール化で実現するか、インテグラル化で実現するかを選択する必要がある。前者では、後になって優良なサブシステムが出現した際に、共通のインターフェースに順応させることで他の機能に影響を与えずパフォーマンスを向上させることが可能となる。一方、後者はサブシステム間の相互依存性が強く、インターフェースを明確に定義しにくい場合に適切な方法である。本研究では、

複合インフラの機能を階層化し、主機能と副機能を整理し、そしてモジュール化・インテグラル化という副機能の設計ルールを選択するといった複合インフラ全体の設計の手順・手法について提案する。

2. 複合インフラの設計事例と設計フロー

空港と公園という典型的な複合インフラに着目し、両タイプの設計方法について考える。本紙では空港機能を階層化した一部分を図1に示す。また具体例として関西国際空港の階層構造を図2に示す。空港は民間が管理する大規模な商業施設を副機能として保有していることがわかる。複合インフラの設計手順をフローにして示すと図3となる。「効率的な副機能の設計方法の選択」では、階層化により明らかになった副機能を設計するための方法を選択する。3. では簡単なモデルを通じて、モジュール化とインテグラル化の選択基準について分析する。

3. 副機能の設計方法の選択モデル

モデルでは副機能の価値を社会的総余剰で表す。まず、副機能を発揮する総敷地面積を z_T とし、A,B という副機能が2種存在すると仮定する。そして各機能を発揮することを得意とする民間企業が2社ずつ存在し、 $i = A_j, B_{j'} (j, j' = 1, 2)$ とおく。各企業が副機能を発揮するために占める敷地面積を z_i 、副機能の社会的余剰を $f_i(z_i)$ とし、社会的余剰の最大値を $F_i = \max f_i(z_i)$ と表す。また、2企業間での最適な敷地面積を $z^*_{i = (z^*_{A_j}, z^*_{B_{j'}})} = \text{式}(1)$ とおく。

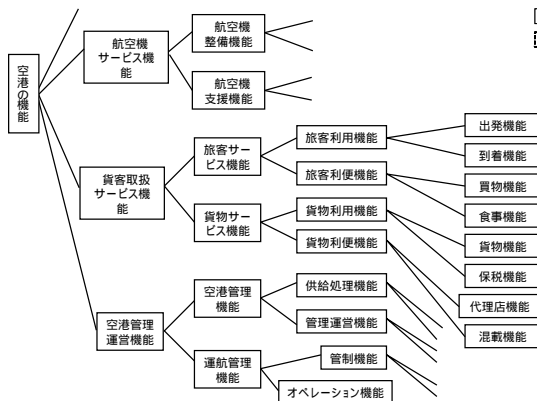


図1 要求機能の階層化

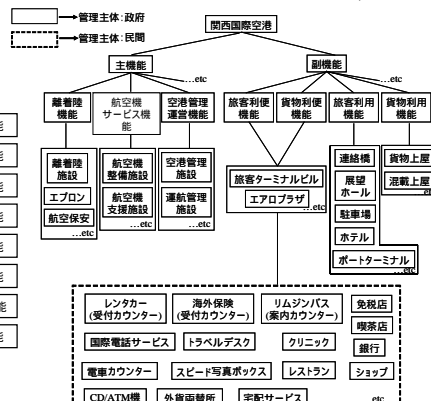


図2 関西国際空港の階層化

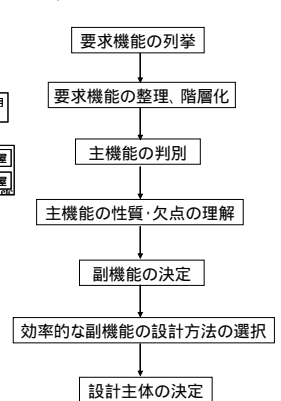


図3 複合インフラの設計フロー

$$\arg \max_{z_{A_j}, z_{B_j'}} \{f_{A_j}(z_{A_j}) + f_{B_j'}(z_{B_j'})\} \quad s.t. \quad z_{A_j} + z_{B_j'} = z_T \quad (1)$$

そして、その際の最適な社会的余剰を $F_i^* = f_i(z_i^*)$ と表す。本研究では、企業が発揮する副機能の社会的余剰を $t = 1, 2$ の 2 期間で考える。モジュール化、インテグラル化の敷地面積の考え方を図 4 に示す。

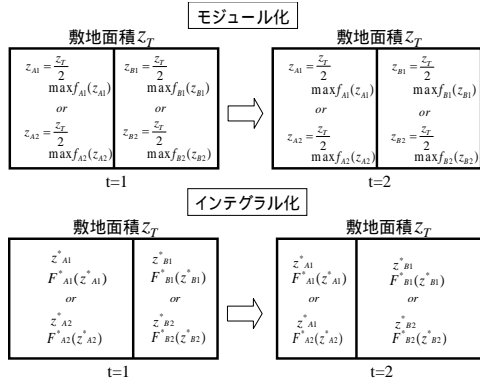


図 4 敷地面積の考え方

モジュール化の場合は、敷地面積をパーティションで半分に区切る。参入する企業は、敷地のインターフェースに順応するために事後的コーディネーション費用 q を支払い、 F_i を発揮すると仮定する。インテグラル化の場合は、異なる 2 社が互いに最適な社会的余剰を発揮するようにパーティションが区切られる。しかし、一度、企業が入れ替わると、パーティションを再設定するための事後的コーディネーション費用 Q をインフラの管理主体である政府が支払うと仮定する。 q, Q は $f_i(z_i)$ には含まれない。

本研究では、 $t=1$ 期に A1, B2 の企業が複合インフラに参入していると考え、 $t=2$ 期の各企業の調子を確率 μ ($0 < \mu < 1$) で好調と仮定する。好調の場合、企業が発揮する機能は通常通り $f_i(z_i)$ で表されるが、不調の場合、機能の社会的余剰は 0 になる。従って、 $t=2$ 期では企業の入れ替えが発生する。 $t=1$ 期の A1, B2 が $t=2$ 期で不調となり、逆に A2, B1 が好調になると、両企業の入れ替えが発生し副機能が更新される。この両替えが起こる確率を P_3 (μ) とする。片方のみの企業が入れ替わる確率を P_2 (μ) とする。また、 $t=2$ 期に同機能を発揮する A1, A2 と B1, B2 が互いに、好調または不調であれば、A1, B2 を入れ替える必要はないと考える。この入れ替えが発生しない確率を P_1 (μ) とする。

そして、モジュール化で設定された複合インフラ

の 2 期間の社会的総余剰を W_M 、インテグラル化の場合を W_I とする。モジュール化の場合の 1 期目のみの社会的余剰を W_{M1} 、2 期目の入れ替えが起こらない場合は W_{M2-1} 、片替えが起こる場合は W_{M2-2} 、 W_{M2-3} 、両替えが起こる場合は W_{M2-4} と社会的余剰をおく。インテグラル化の場合も同様の状況を考え、 W_{I1} 、 W_{I2-1} 、 W_{I2-2} 、 W_{I2-3} 、 W_{I2-4} と社会的余剰をおく。両社会的総余剰を式(2),(3)で表す。

$$\begin{aligned} W_M &= W_{M1} + W_{M2-1} + W_{M2-2} + W_{M2-3} + W_{M2-4} \\ &= F_{A1} + F_{B2} - 2q + P_1(F_{A1} + F_{B2}) + \frac{P_2}{2}(F_{A1} + F_{B1} - q) \\ &\quad + \frac{P_2}{2}(F_{A2} + F_{B2} - q) + P_3(F_{A2} + F_{B1} - 2q) \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W_I &= W_{I1} + W_{I2-1} + W_{I2-2} + W_{I2-3} + W_{I2-4} \\ &= F_{A1}^* + F_{B2}^* + P_1(F_{A1}^* + F_{B2}^*) + \frac{P_2}{2}(F_{A1}^* + F_{B1}^* - Q) \\ &\quad + \frac{P_2}{2}(F_{A2}^* + F_{B2}^* - Q) + P_3(F_{A2}^* + F_{B1}^* - Q) \quad (3) \end{aligned}$$

式(2)の社会的余剰のみの和を Δ_1 、式(3)の社会的余剰のみの和を Δ_2 とおき、両総余剰を比較した。その結果を表 1 にまとめる。

表 1 モデルの考察

qの値	比較	選択
$q < \frac{\Delta_1 - \Delta_2 + (P_2 + P_3)Q}{(P_2 + 2P_3 + 2)}$	$W_M > W_I$	モジュール化
$q > \frac{\Delta_1 - \Delta_2 + (P_2 + P_3)Q}{(P_2 + 2P_3 + 2)}$	$W_M < W_I$	インテグラル化
Qの値	比較	選択
$Q > \frac{\Delta_2 - \Delta_1 + (P_2 + 2P_3 + 2)q}{(P_2 + P_3)}$	$W_M > W_I$	モジュール化
$Q < \frac{\Delta_2 - \Delta_1 + (P_2 + 2P_3 + 2)q}{(P_2 + P_3)}$	$W_M < W_I$	インテグラル化

4. 数値シミュレーション

図 5 は好調の確率との関係を示す。他のパラメータには左図では空港を、右図では公園を想定した値を与えている。空港はモジュール化、公園はインテグラル化が適切であることがわかる。

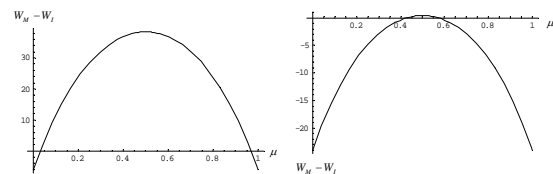


図 5 設計方法の決定基準

5. おわりに

本研究では、機能面の設計のみに着目したが、今後は、顧客領域や工学的なプロセス領域を考慮し、インフラの総合的な設計論を展開する必要がある。