

[特 集]

インフラストラクチャ・マネジメント研究の 課題と展望

小林潔司¹・上田孝行²

¹フェロー会員 工博 京都大学教授 大学院工学研究科都市社会工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

E-mail: kkoba@psa2.kuciv.kyoto-u.ac.jp

²正会員 工博 東京工業大学助教授 大学院理工学研究科国際開発工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡 2-12-1)

E-mail: tueda@plan.cv.titech.ac.jp

本稿では、伝統的な工業経済学、信頼性工学における修繕・補修モデルの考え方を述べ、インフラストラクチャ・マネジメントへの適用可能性について言及する。インフラストラクチャ・マネジメント問題のプロトタイプを一般的な確率インパルス制御モデルとして定式化し、その基本的な解法を示す。また、その特殊型として離散型確率動的計画モデルを定式化するとともに、その活用方法を示す。さらに、IM の高度化のために必要となる研究課題、中でもプロジェクト会計システム、制度的メカニズム設計に関わる研究課題の重要性について考察し、本特集論文の位置づけと今後の研究の方向性についてとりまとめる。

Key Words : *infrastructure management, maintenance/replacement, stochastic control, accounting, mechanism design*

1. はじめに

わが国では、公共事業に対して厳しい批判が提示されている。また、財政制約上、新規投資が今後も現在の水準で推移するとは考えにくい。現在のインフラストラクチャ（以下、インフラと略す）のストック水準が適正か否かという議論は別にしても、すでにわが国では膨大なインフラ・ストックが蓄積されている。今後は効率的な分野への新規投資が必要とされるだけでなく、既存ストックを維持管理しながら最大限有効に活用し、必要な更新投資を実施しなければならない。

インフラストックの増加に伴って、維持・補修費は年々増加の傾向を辿っている。たとえば、舗装事業に関しては、1980 年代より新規事業費が減少していく中で、1990 年代には補修修繕費の占める割合が逆転したことが指摘されている¹⁾。既存インフラの老朽化に伴って今後必要となる更新需要について、いくつかの予測が試みられている。例えば、高橋・横田²⁾は港湾施設を対象として、2000 年時点での補修費と更新費は全体事業費の 2.8% と 6.7% を占めているものの、2025 年にはそれぞれ 11.7% と 17.6% にまで拡大するとしている。

一方、インフラの老朽化を放置することは、災害リスクを高める危険性もある。阪神・淡路大震災以降、インフラの信頼性に対する国民的関心は非常に高く、インフラの維持管理/更新は、災害リスクへの対応としても極めて重要である。国内での新規投資需要の伸びが期待できない中で、今後土木施設の維持/更新等、効率的なインフラ・マネジメント（infrastructure management：以下、IM と略す）に対する需要は確実に増加する。

IM を簡潔に定義することは難しい。マネジメントという用語の意味はそれを扱う分野により異なり、統一的な定義を与えることは不可能である。それでも敢えて定義すれば、狭義には「不確実な将来において、生じ得る状況毎に実行する行動をルールとして事前に決定し、状況を的確に把握しながらそれを遵守すること」と言える。広義には、これに「とりまく環境についての知見を取り入れながら、ルール自体を改善していくこと」を加えることができよう。

マネジメントの多様性と対応して IM の定義も多様である。広義には、IM はインフラの維持/更新問題を部分問題として包含するような複合的なマネジメント問題を意味する。最近では、メタマネジメントとでも呼ぶべき IM モデルもいくつか提案されている。

このように広義の意味における IM では、意思決定者による課題の発見や認知、課題の構造化、解決のプロセスなどの非常に深遠かつ広汎な問題についても考えなければならない。狭義の IM はハード・ソフト技術を駆使したインフラの維持/更新のマネジメントを意味している。本特集論文では、狭義の意味におけるインフラの維持/更新マネジメントモデルを取り上げており、本稿では IM で用いられるインフラの維持/更新モデルに関する展望に焦点を絞りたい。したがって、狭義の IM を支えるハードな技術体系に関しては議論の対象としない。

本稿では、建設段階から供用期間中の維持/更新を含む長期的な IM について、筆者らの基本的な考え方を示し、それに基いて今後の研究課題を展望する。以下、2. では、関連分野における既存の維持/更新問題へのアプローチを整理する。3. では、IM 課題を離散型確率的インパルス制御 (stochastic impulse control : 以下、SIC と略す) 問題として定式化する。4. では SIC 問題の特殊型として確率動的計画モデルを定式化し、その最適解として状況依存的な更新ルールが得られることを示す。5. では IM の高度化の課題として、最適維持/更新問題、プロジェクト会計システム、契約等の制度メカニズム設計の問題をとりあげる。

2. 維持/更新に関する既往の研究概要

(1) 既往の代表的アプローチ

維持/更新については、大別してシステムの信頼性を基準とする信頼性工学^{3) - 7)}と、ある信頼性を保持するもとの費用効率性を基準とする工業経済学における Replacement Analysis(RA)^{8) - 19)}の分野で研究が蓄積された。信頼性工学は、システムの信頼性の観点から、損傷したシステムまたはその構成部品等の取り替え時期や回数などを求めることを目的としている。一方、工業経済学における RA では、既に稼動している既存システム(または対象とする部品)を防衛者(defender)とし、それを代替する候補になる新規システムを挑戦者(Challenger)とする。防衛者は挑戦者によって丸ごと取って代わられることが想定され、また、挑戦者は防衛者に取って代わったとしても、将来はいずれ同タイプの挑戦者によって取って代わられるものとする。それぞれの平均寿命の最小公倍数をとり、その期間における等価一様年間費用(Equivalent Uniform Annual Cost: EUAC)を算出して費用比較を行い、低い方を採択するという手法である。これにより、ある時点で取替えを行うか否かの判断

を行うことができる。当然ながら、信頼性と費用の両面を考慮した両者の中間的なバリエントとして位置づけられる手法は多数考えられる。さらに、これら 2 つのアプローチの考え方を取り入れた動的な意思決定モデルも多数開発されている。以下では、両者のアプローチの中から、信頼性工学における最も基本的なモデルと土木工学の構造設計分野での信頼性評価を取り上げて、IM に適用するうえでの課題について言及する。

(2) 信頼性工学のアプローチ

信頼性工学に関する教科書は多数ある^{3) - 7)}。そこでは、観測や実験によってシステムまたはその構成部品の故障確率を推定し、故障過程をモデル化する方法が採用されている。その上で、信頼性を向上/保持するために必要な修繕/取替え戦略を求める手法が開発されている。信頼性工学における最も単純なモデルは、システムまたは構成部品が所与の機能を発揮できる状態を正常状態、発揮できない状態を故障状態とする 2 状態モデルである。ある時点 t までに故障している確率を $F(t)$ とすれば、その時点で故障状態に無いことが信頼性であり $R(t) = 1 - F(t)$ で表される。システム全体の信頼性は、それを構成する部品の信頼性に依存している。システムの構造に基づいてシステム全体の信頼性を求める方法も多数提案されている。信頼性工学の文献では、物理的な特性を表す諸元と信頼性の関係については実験結果に基づいた知見が既に数多く蓄積されている。ただし、システムの劣化が実システムを取り巻く環境に大きく依存していることが事実であるにも関わらず、試験体レベルで実験結果に比べて実システムレベルでの知見の蓄積は容易でなく、データの蓄積も未だ大きな課題であるとする見解²⁰⁾も見られる。

いま、状態 $x(t) \in \mathbb{X}$ について、システムがある機能を発揮できる臨界水準を \bar{x} として、 $x(t) \leq \bar{x}$ であることを正常状態にあるとする。 $x(t) \leq \bar{x}$ の実現した経路を $\omega \in \Omega$ でラベル付けするものとし、 $x(\omega, t) \in \mathbb{X}$ で表す。任意の時点 t におけるシステムの信頼性 $R(t)$ は

$$R(t) = 1 - \int_{\omega \in \Omega} \delta(\bar{x} - x(\omega, t)) P(\omega) d\omega \quad (1)$$

と定義できる。なお、 $\delta(\cdot)$ は以下のステップ関数であり、 $P(\cdot)$ は経路 ω が実現する確率密度関数である。

$$\delta(x) = \begin{cases} 1 & \text{for } x \geq 0 \\ 0 & \text{for } x < 0 \end{cases} \quad (2)$$

信頼性工学では、対象とするシステムが修復系か、非修復系かにより異なったアプローチが採用される。前者は故障部品の取り替えが可能なシステムであり、修復を適切に行えばシステムの寿命は無限になる。後者は構成部品の取替えができないシステムであり、ネットワーク構成の冗長性を考慮してシステム全体の信頼性を如何に保持するかが重要になる。

修復系の信頼性工学では、ある時点または一定期間におけるアベイラビリティ(availability)を最大にするような取替えルールが検討されてきた。アベイラビリティは信頼性をより拡張した概念であり、信頼度に加えて修復のしやすさの指標である保全性を考慮したものである。保全性は、構成部品の故障によってシステムが機能しない時点から時間 τ の間にシステムが修復されて機能を回復する確率 $M(\tau)$ で表される。故障が生じるとすぐに修復を行うとすれば、ある時点のアベイラビリティは、次式で示される。

$$A(t) = R(t) + \int_0^t F(t-\tau)M(\tau)d\tau \quad (3)$$

ある一定期間の平均アベイラビリティーにはいくつかの定義があるが、無限期間での平均を考えると、平均故障間隔時間(mean time between failure: MTBF)と平均補修時間(mean time to repair: MTTR)を用いて、

$$A = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T A(t)dt = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (4)$$

と定義される。

信頼性工学では、構成部品に故障が生じるとその取替えを行う事後修復(Emergency Repair)が想定されている。事後修復は Corrective Maintenance とも呼ばれる。一方、まだ故障に至っていない時点で予防的に取替えを行う場合は Preventive Maintenance と呼ばれる。事後修復だけを繰り返す管理戦略を用いた場合、ある時点までに生じた故障回数がそのまま修復回数に一致する。一定の期間において必要な修復費用はこの回数の期待値によって代表されることになる。このような故障/修復プロセスは Renewal Process と呼ばれ、その確率過程の特性に関して研究が蓄積されている^{21) - 23)}。さらに、修復系のシステムの保全戦略を考える場合には、構成部品の取替えを繰り返すことが前提になるため、設計段階において、第1に取替えが容易に(低成本で)行えるように設計すること、第2に、取替えのルールを事前に設定しておくことが必要になる。一方、非修復系では故障した構成部品を修復できないため、設計段階においてある一定の信頼性を確保することが必要になる。非修復系に含まれる構成部品の寿命は、ある実現した劣化の経路 ω について

$$\tau(\omega) = \min \{ t \mid \bar{x} \geq x(\omega, t) \} \quad (5)$$

と定義される。劣化は確率過程であるため、寿命も確率変数であり、次のような期待値で定義できる。

$$\bar{\tau} = E_\omega(\tau(\omega)) = \int_{\omega \in \Omega} \tau(\omega) P(\omega) d\omega \quad (6)$$

(3) 土木構造物に関する信頼性評価の現状

土木工学の構造設計においても信頼性に関する研究成果は取り入れられている。供用期間中に生じる様々な確率的現象と設計・施工段階における多様な不確定要因を勘案して、構造物の信頼性を直接・間接に評価している。

土木分野での信頼性解析（例えば、土木学会²⁴⁾、尾坂・高岡・星谷²⁵⁾を参照）は、水準I、II、IIIに分類されている。水準IIIは関係する変数の確率分布を明示的に考慮して直接的に破壊(故障)確率で構造物の信頼性を評価する。水準IIでは平均と分散に関する情報から安全性指標 β を算出して破壊確率に代えてそれで信頼性を評価する。水準Iは荷重係数設計法と呼ばれ、強度と荷重に係数を乗じて大小関係を確認するという形式で安全性を照査する。形式的には確率モデルが用いられていないよう見えるが、それぞれの係数を決定する背後には確率モデルがあるという意味で間接的に信頼性を評価している。

これらのいずれの水準で信頼性を評価するにせよ、長期的な時間視野において信頼性を照査する際には変数を時間依存の確率過程として考慮することが必要である。供用期間中に作用する外力(地震外力)が確率的であること、あるいは材料強度が腐食や疲労によって低下することなどを考慮して照査することの重要性に注意しなければならない。従って設計段階においてはこれらの確率過程を正確にモデルとして取り込むことが根本的に重要になる。また、供用後においては、構造物の損傷や劣化を点検により把握して耐荷力評価を行って信頼性を評価するとともに点検時以降の劣化を予測しておくこと(例えば、土木学会(1989)²⁴⁾などを参照)が補修・更新の実施を判断する上で不可欠になる。

物理的な破壊基準をある一定の性能や機能が保持できないとするよりもさらに一般的な基準に広げ、そして、上に述べたような既に土木分野の信頼性解析で用いられている確率分布を援用すれば、インフラについても式(5)に示した定義を用いて寿命を定義することが可能である。しかし、実際にはインフラの供用寿命は設計においては先駆的に与えられたものとして設定され、その期間において生じる地震外力等を確率的に扱うことで供用期間中に保持される

信頼性を評価することが行なわれている。

(4) IM の視点から見た課題

信頼性工学、工業経済学のアプローチはいずれも一般的な工業製品の信頼性を対象としている。前者では、1つの製品をシステムとして把握し、その信頼性をアベイラビリティという視点から評価する。後者においても、工作機械のような1つの設備が対象となっており、伝統的なキャッシュフロー分析による現在価値、特に費用を用いてが維持/更新戦略を検討している。信頼性工学、工業経済学の手法をIMに用いる場合、インフラの特性に付随していくつかの克服すべき課題が存在する。以下では、システム全体の信頼性、寿命という視点から、IMにおいて重要な課題について考察する。

土木構造物は大規模システムであり、工業製品や工場設備よりも複雑な構造を有する場合が少なくない。(3)で述べたように、土木構造物の構成部材の信頼性については、試験体レベルで多数の知見があり、設計段階でも信頼性について照査が行われる。しかし、土木構造物全体についての信頼性、さらにはインフラ・ネットワーク全体の信頼性を解析することは容易ではない。供用期間中の構造物の点検結果に基づいて、土木構造物全体の信頼性をリアルタイムで評価するシステムが十分に定着しているとは言えない。IMの立場からは、設計段階だけでなく、供用期間中の点検結果から土木構造物の信頼性を評価するシステムの開発が必要となる。

インフラ・ネットワークの信頼性に関しては、伝統的な信頼性工学のアプローチに基づいて道路網や鉄道網の信頼性を分析した事例は多数^{26) - 28)}存在する。しかし、ネットワークの各リンク/ノードを構成する土木構造物の劣化状態を考慮して、例えば災害に対するインフラ・ネットワークの信頼性を評価した研究事例は筆者らの知る限り見当たらない。当然のことながら、土木構造物の信頼性評価自体が容易ではなく、それよりも上位のネットワークレベルの信頼性を十分な精度で評価することはさらに困難である。しかし、IMの立場からは、不特定多数の人間が用いるインフラ・ネットワーク全体の信頼性を確保することが最終的な課題である。

工業経済学の文献^{13) - 14)}では工業製品の寿命(Product Life)として4つの概念を提示している。

1)物理的寿命(Actual Physical Life)：新規に製造された製品が実際に使用できる期間。

2)償却寿命(Depriciation Life)：製品の価値が減耗して消滅する会計上の期間。

3)供用寿命(Service Life)：製品の生み出すサービスが

ある一定水準以上を保持できる期間。

4)経済寿命(Economic Life)：製品から得られる経済的利益が最大になる使用期間である。

4)の経済寿命は、製品の調達と再販売の両方を最適なタイミングで行うことが前提であり、厳密には最適スケジューリングを求める最適化問題の解によって定義される²⁹⁾。インフラの寿命に関しては、これまで主として土木構造物の物理的寿命について議論されてきた。構造物が所与のサービスが提供できなくなる状態により物理的寿命を判断しているとすれば、供用寿命と物理的寿命が同一視されているとも考えられる。このような理解は、インフラが一般的の工業製品と異なり、市場で転売/再販されることはなく、1回の供用寿命しか経ることがないという理由による。インフラは政府部門（地方公共団体も含む）の所有になっているものが多い。公的会計においては一般に企業会計に見られる償却概念がインフラには適用されず、耐久工業製品でいう償却寿命の概念はない。しかし、公営企業あるいは民間企業がインフラを所有する場合は、会計上の償却概念が適用されることになり、インフラの償却寿命を定義できる。ただし、転売/再販が不可能なインフラであれば、償却寿命も1回だけ発生することになる。以上の理由より、インフラ事業の開始から終了までの期間をプロジェクトライフと呼び、1回だけの供用寿命を考慮するという方法が取られてきた。しかし、最近ではインフラの長寿命化という新しい課題が生まれてきた。インフラの長寿命化を達成した場合、通常の方法では供用寿命が終了したのちでも長寿命化されたインフラがサービスを供用することになる。長寿命化の経済効果を検討する場合、供用寿命の異なるインフラの経済効果を比較する必要が生じる。この場合、インフラが早く寿命を終えたことにより逸失した純效益を長寿命化の経済効果に組み入れることが必要となる。したがって、供用寿命を1回だけと考えるのではなく、長期的な視野の中におけるインフラの供用シナリオを考慮することが必要となる。また、インフラには機能そのものの陳腐化という社会的寿命も存在する。社会的寿命を考える場合には、インフラの転用や更新の問題も考慮したアプローチが必要となる。

3. 最適維持/更新問題として見たIM

(1) 最適維持/更新問題

対象とするインフラの特性やその管理・運用方法に応じて維持/更新問題の構造は多様に異なる。まず、

維持/修繕を管理する意思決定レベルにより、1) 単一のインフラの維持/更新、2) システムとしてのインフラの維持/更新、3) 複数のインフラで構成されるネットワークレベルでの維持/更新、という3つのレベルが考えられる。既往のインフラの維持/更新モデルの多くは、単一のインフラの更新を対象としたものである。しかし、橋梁のような複雑なインフラはそれぞれの部材だけでなく、橋梁全体としての維持/更新戦略が必要となる。さらに、道路網、上・下水道等、ネットワーク施設の維持/更新戦略も必要となる。維持/更新モデルに関する研究の蓄積は浅く、2) 3) をとりあげた研究事例は極めて少ないので実情である。これら複雑な維持/更新戦略を考えるためには、その基礎となる単一インフラの維持/更新モデルに関する研究の蓄積が必要となる。本稿の以下では、単一インフラの維持/更新モデルに焦点を絞ることとする。

単一システムの維持/更新問題に焦点を絞っても、インフラの運用計画によりアプローチの方法が異なる。インフラが半永久的に供用される場合、インフラが供用される限り便益が発生するため、維持/更新戦略の検討にインフラがもたらす便益を考慮する必要はない。ライフサイクル費用を最小にするような維持/更新戦略を検討すればいい。しかし、将来時点でインフラの転用や容量増強が予定されている場合、インフラの最適な供用年数を考慮に入れたアプローチが必要となる。一度、インフラがもたらす便益や残存期間を考慮したような維持/補修戦略を検討することが必要となる。このようにインフラの維持/更新問題はインフラの運用計画により多様な内容を持っている。すべてのタイプの問題に適用可能な維持/更新モデルを開発することは不可能であり、問題のタイプに応じた維持/更新モデルを開発せざるを得ない。本節では、多様な内容を持つ維持/更新問題のタイプの中から、もっとも簡単な内容を持つ問題をとりあげる。すなわち、無限の供用期間を有する单一インフラの維持/更新問題に焦点をあてることとする。このタイプの問題では、期待ライフサイクル費用を最小にするような維持/更新戦略を分析することが課題となる。

(2) 劣化過程とインパルス制御

インフラの計画から建設、運営、維持管理を経て更新に至るまでのプロジェクトライフは長期にわたり、その間に生じる外的環境の変化を事前に確定することは不可能である。インフラの管理者（以下、管理者と呼ぶ）は、将来の各時点で生じるそれぞれ

の状態毎に実行すべき行動を事前にルールとして定めておく必要がある。以下では、最適維持/更新問題を定式化し、インフラの維持/更新ルールを求める基本的な考え方を説明しよう。いま、インフラの状態変数 $x(t)$ の定義域を \mathbf{X} 、行動変数 $u(t)$ の定義域を \mathbf{U} と表そう。プロジェクトライフにおける任意の時点 $t \in [0, \infty)$ におけるインフラの劣化状態 $x(t) \in \mathbf{X}$ は不確実な外的環境 $\omega(t)$ と管理者の行動 $u(t) \in \mathbf{U}$ に依存して確率微分方程式

$$\dot{x} = g(x(t), u(t), \omega(t)) \quad (7)$$

に従って推移する。初期劣化状態を $x(0) = \bar{x}(0)$ と表す。 $\bar{x}(0)$ は確定値である。最適維持/更新ルールは状態 $x(t) \in \mathbf{X}$ と行動 $u(t) \in \mathbf{U}$ の間に成立つ写像

$$M : x(t) \in \mathbf{X} \rightarrow u(t) \in \mathbf{U} \quad (8)$$

として定義できる。修繕や更新投資は時間軸上の限られた時点においてのみ実施される場合が少くない。すなわち、管理者の行動 $u(t) \in \mathbf{U}$ は連続変数ではなく、特定の時点においてのみ特定の数値をとれるインパルス制御変数で表される。いま、修繕が時点 $\theta_k (k = 1, \dots)$ で実施されるとし、インパルス制御変数 $u(t) \in \mathbf{U}$ を

$$u(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } t = \theta_k (k = 1, \dots) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

と定義しよう。インパルス制御が実施される時点 $\theta_k (k = 1, \dots)$ において、状態は所与の回復水準 X に離散的にジャンプする。劣化過程がインパルス制御される時には劣化過程(7)は

$$\dot{x}(t) = h(x(t), \omega(t)) + \{X - x(t)\} u(t) \quad (10)$$

と表すことができる。この時、インパルス制御の前後において、状態変数が

$$x(\theta_k) = \lim_{\tau \rightarrow 0} \int_{\theta_k - \tau}^{\theta_k} h(x(\tau), \omega(\tau)) d\tau \quad (11.a)$$

$$x(\theta_k) = X (k = 1, \dots) \quad (11.b)$$

と変化すると考えよう。このようにIMのプロトタイプをSIC問題として表すことができる。

(3) SIC問題の基本形式

いま、時点から終端時刻に至るプロジェクトライフ期間中の期待ライフサイクル純便益の現在価値を最大にするようにマネジメントを行う問題を考えよう。いま、状態変数のサンプルパス $\omega(t)$ と表そう。また、回復水準 X も選択することが可能であると考えよう。この時、管理者が解くべき最適化問題は

プロジェクトの期待純便益を最大にするようにインパルス制御を実施するタイミング θ_k と回復水準 X を求める問題

$$V(x(0)) = \max_{u(t) \in U, X} E_\omega \left[\int_0^\infty \pi(x(t)) \exp(-\rho t) dt \right. \\ \left. - \sum_{k=1}^K \{F(x(\theta_k), X) + Q\} \exp(-\rho \theta_k)\right] \quad (12.a)$$

s.t.

$$\dot{x}(t) = h(x(t), \omega(t)) + \{X - x(t)\} u(t) \quad (12.b)$$

$$x(0) = \bar{x}(0) : given \quad (12.c)$$

として定式化できる。ただし、 $\pi(x(t))$ は時点 t においてプロジェクトが生み出す便益を表す。サンプルパス $\omega(t)$ ごとに最適行動 $u^*(t) \in U$ が定義される。 $E_\omega[\cdot]$ はサンプルパス ω に関して期待値をとる演算子であり、 ρ は社会的割引率である。汎関数(12a)の右辺第1項は便益の現在価値を、第2項は修繕費用の現在価値を表す。 $F(x(\theta_k), X) + Q$ は修繕費用であり、修繕が実施されるタイミング θ_k においてのみ非負で有限の値をとる。SIC 問題では限られた時点においてのみ修繕が実施されるため、修繕費用には固定費用 Q が含まれる。固定費用が存在しなければ、SIC 問題の最適行動は連続関数で与えられ、SIC 問題は通常の確率制御問題になる。

SIC 問題は、インパルス制御のタイミングを決定する問題として与えられるため、通常の最適制御問題の最適化条件（ポントリヤーギンの最大値原理）を適用することができない。このような特殊な構造を持つ確率最適制御問題（最適停止問題）に関しては、金融工学の分野で研究が進展した³⁰⁾⁻³³⁾。このような金融工学手法をはじめて IM 問題に適用した研究として栗野等³²⁾があげられる。SIC 問題を最適停止問題のアルゴリズムを用いて解いてみよう。いま、ある時刻 t において修繕を実施しないことが最適であることが判明しているとしよう。時刻 t における最適値関数を

$$V(x(t)) = E_\omega \left[\int_t^{t+dt} \pi(x(t)) \exp\{-\rho(u-t)\} du \right. \\ \left. + \exp(-\rho dt) V(x(t+dt)) \right] \quad (13)$$

と表すことができる。栗野等は式(12b)がトレンドを持つ幾何ブラウン運動³⁶⁾

$$\dot{x}(t) = -\alpha x(t) dt - \beta x(t) dW(t) \quad (14)$$

に従う場合、式(13)を t の近傍で Taylor 展開することより、微分方程式

$$-\alpha x \frac{dV}{dx} + \frac{\beta^2}{2} x^2 \frac{d^2V}{dx^2} - \rho V + \pi(x) = 0 \quad (15)$$

が得られることを示した³⁴⁾。ただし、 α, β は劣化過程を規定するパラメータ、 $W(t)$ は正規分布 $N(0, t)$ に従うウィナー過程である。劣化過程が初期値 $\bar{x}(0)$ から始まり、修繕しないことが最適である限り、施設の資産価値を表す最適値関数 $V(t)$ は微分方程式(15)に従って変化（減少）する。劣化過程が異なれば異なる微分方程式が誘導されることは言うまでもない。いま、劣化の進展により状態変数 $x(t)$ の値が小さくなると仮定しよう。修繕を実施しないことが最適である限り（状態変数 $x(t)$ がある臨界的な x^* に到達するまで）微分方程式(15)が成立する。また、修繕後の最適な劣化水準を X と表そう。さらに、修繕費用関数が $F(x(\theta_k), X) = f(X - x(\theta_k))$ と与えられ、2 次の最適化条件を満足するとしよう。最適臨界水準 x^* において

$$V(x^*) = \max_x \{-f(X - x^*) - Q + V(X)\} \quad (16)$$

が成立する。ここに、 $V(X)$ は修繕後の劣化水準 X から最適に修繕を実施した場合に得られる最適値関数である。式(16)を最大にするような最適な回復水準 X を X^* と表そう。式(16)は臨界 x^* で修繕を実施するのが最適であれば、修繕前の x^* において定義される最適値関数と、修繕後の劣化水準 X^* で定義される最適値関数と修繕費用の和が等しくなるという value matching 条件を表している。ここで、最適値関数 $V(X)$ と修繕費用 $f(X - x)$ が 2 回連続微分可能であるとしよう。この時、SIC 問題は微分方程式(15)を境界条件

$$V(x^*) = -f(X^* - x^*) - Q + V(X^*) \quad (17.a)$$

$$\frac{\partial f(X^* - x^*)}{\partial X^*} = \frac{dV(X^*)}{dX^*} \quad (17.b)$$

$$\frac{dV(x^*)}{dx^*} = \frac{\partial f(X^* - x^*)}{\partial x^*} \quad (17.c)$$

の下で解く問題に帰着される。式(17a)は前述の value matching 条件、式(17b)は回復状態 X^* に関する最適条件、式(17c)は臨界水準 x^* において最適値関数が連続微分可能であるための smooth pasting 条件³⁵⁾である。このように SIC 問題は微分方程式を解く問題に帰着する。しかし、現実の IM 問題では最適値関数が臨界水準 x^* で微分可能でなく smooth pasting 条件が成立しない場合が少なくない。この場合、境界条件が 1 本

足りなくなり微分方程式法を用いて最適ルールを求めることができない。たとえば、田村等は修繕関数が修繕前後の状態に関わらず一定となる場合には臨界水準において最適値関数の微分可能性が成立せず、微分方程式法を利用できることを示した。その上で、モンテカルロシミュレーションにより最適修繕ルールを求めている方法を提案している³⁹⁾。さらに、本特集の慈道等³⁷⁾は劣化水準が点検を通じてのみ観測可能な SIC 問題を対象として、積分方程式により最適ルールを求める方法を提案している。このように IM 問題の特性に対応して、SIC 問題を解く方法が異なる。SIC 問題の解法に関しては研究が蓄積されておらず、今後の研究に期待するところが大きい。

(4) 維持/更新問題への適用方針

IM はプロジェクトに関わる多くの要因のマネジメントを含む広汎な概念である。しかし、本稿では IM をインフラの維持/更新に関する意思決定問題に限定している。具体的 IM 問題に対しては、個々のインフラの特性に応じた最適維持／更新モデルを定式化する必要があり、SIC モデル(12a)-(12c) は、多くの IM 問題に共通する特性を表現したものである。しかし、

IM 問題の特性に応じて、各種の拡張や再定式化を試みる必要があることは言うまでもない。具体的な IM 問題では、SIC モデル(12a)-(12c)の状態変数、行動、純便益は表-1 に示すような指標を用いて表現されることになる。

インフラの種類によっては、劣化水準が離散的状態変数を用いて定義される場合も少なくない。本特集における貝戸等³⁹⁾、Madanat and Guillaumot⁴⁰⁾は、劣化状態を数段階のカテゴリーに分類した離散的状態変数を用いている。インフラの物理的特性のほとんどは連続量として表現されるが、実際の検査では数値的な検査結果が報告されるだけでなく、それらに加えて、専門家の目視による総合的な判断が行われるため、状態を離散的なレベルに分類して記述する場合が少くない^{41),42)}。劣化水準が離散的状態変数で表現される場合、離散的な状態の間での推移過程を吸収マルコフ行列で表現したマルコフ決定モデルが有用である。本特集においては、Madanat and Guillaumot⁴⁰⁾がマルコフ決定モデルを提案している。

IM を資産管理(asset management)のアプローチで考えると、インフラの資産価値を会計システムによって常にモニタリングすることが必要である。米国あるいは我が国で一部試みられている資産管理のアプローチ^{43),44)}は、インフラの資産価値を貸借対照表(Balance Sheet: BS)により表現し、その中で減価償却により資産価値の減価を表現する、あるいは将来発生する維持/更新費用を現在価値で反映させる方法を採用している。BS で資産管理を行うとすれば、負債などのプロジェクトの財務状態を表す変数も状態変数 $x(t)$ に含めが必要になり、また、将来の維持/更新をどのような財源によってファイナンシングしていくかという視点から、行動 $u(t)$ には借入額や増資額、あるいは返済、配当額なども変数に含める必要があろう。

表-1 IM における問題の構成要素

状態変数 $x(t)$	
物理的	劣化レベル(離散的分類) 破損量(亀裂長等) 耐力(信頼応力等)
経済的	サービス需要(交通量等)
財務的	価格(時間価値、資材単価、金利等) 資産(現金、売却可能資産等) 負債(借入金残高等)
行動 $u(t)$	
物理的	修復/取替個所数 修復量(被覆表面積/体積等)
経済的	投資(実物投資額)
財務的	借入/返済 料金水準
純便益 $\pi(t)$	
経済的	平常時利用者便益 平常時外部経済費用 災害時損失期待額 修繕/取替時損失期待額 平常時料金収入 平常時運営費用 修繕/取替工事費 災害時収入損失期待額 修繕/取替時損失期待額 借入金収入/返済金支出 金利支払い/資産運用益 資産売却収入/購入支出 投資支出

4. 離散型確率制御を用いた IM の例

(1) 離散型確率制御モデル

既往の維持/更新モデルは、例えば橋梁の維持修繕プログラムパッケージである PONTIS でも採用されているマルコフ決定モデルのように離散型確率制御モデルを用いる場合が多い。インフラの種類によっては、構造物の劣化水準(機能水準)を連続的状態変数 $x(t) \in \mathbb{X}$ で表現することが困難であり、離散的なカテゴリー変数で表現せざるを得ない場合

が少なくない。このような離散的な状態変数を用いた場合、マルコフ決定過程のような離散的確率制御モデルによるアプローチの方法が有効である。離散型維持/修繕モデルはこれまでの維持/更新戦略に関する文献により幅広く用いられてきた経緯もあり、読者の理解を助けるために上田らによる離散型確率動的計画(Stochastic Dynamic Programming:以下、SDPと略す)モデルを具体的に紹介しよう⁴⁹⁾。

(2) 問題設定

いま、ある土木構造物(たとえば道路橋)の構造部材を取替えながら、ある一定のプロジェクトライフにおける社会的純便益を最大化する問題をとりあげよう。時間軸を離散化し、プロジェクトライフを40期に分割しよう。第1期の時点を $t=1$ とし、構造部材の物理的状態を4つの離散的状態変数

$$i(t) = i \in \{1, 2, 3, 4\} \quad t \in \{1, \dots, 40\} \quad (18)$$

で表そう。状態変数値 i が大きくなるほど、劣化が進行していると考える。劣化の進行過程を状態変数間の推移確率として表現する。終末残存価値は状態によらずゼロとする。状態変数が i の時に管理者がとりえる行動 $u_i(t)$ は、部材を取替るか、取替えを見送るか、のいずれかであり、それぞれ

$$u_i(t) = \begin{cases} 0 & \text{取替えを見送った場合} \\ 1 & \text{取替えた場合} \end{cases} \quad (19)$$

と表す。純便益 $\pi_i(t)$ を状態 $i \in \{1, 2, 3, 4\}$ ごとに

$$\begin{aligned} \pi_i(t) &= \{\bar{b}(R_i - l_i u_i(t) h(t) - \bar{c}) - C_i u_i(t) \\ &= (\bar{b} R_i h(t) - \bar{c}) - (\bar{b} l_i h(t) + C_i) u_i(t) \end{aligned} \quad (20)$$

と定義する。ここに、 \bar{b} は交通量1単位当たりの年間利用者便益、 R_i は状態 i において構造物が使用可能な確率であり信頼性を表す。 $1 - R_i$ が災害等によって使用不能になる確率であり、劣化が進行するほど信頼性は小さくなる。 l_i は取替工事によって使用不能になる日数の年間日数に対する割合である。この係数は取替を実施する場合には有効になるが、見送る場合は純便益には影響しない。 $h(t)$ は年当たり交通量であり、一定率で変化するとする。 \bar{c} は取替とは関係なく発生する年間運営費用である。 C_i は状態 i において取替を実施する場合の取替工事費用である。IMは時点と状態 i に応じて取替えを実施するべきか、見送るべきかを対応させたルール $u_i(t) \in \{0, 1\}$ を導出する問題として表される。どの劣化状態にあっても、

取替を実施した場合は、その次の期にはレベル1の状態に確率1で移るものとする。

一定量の交通量 \bar{h} が通過した場合に、物理的状態が推移する確率を表したマルコフ行列を

$$\bar{P} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & 0 & 0 \\ 0 & P_{22} & P_{23} & 0 \\ 0 & 0 & P_{33} & P_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

と定義する。ある期において、年間交通量が $h(t)$ であると予想されている場合には、その期における状態推移は行列 \bar{P} を $h(t)/\bar{h}$ 回乗した行列

$$P^o(t) = \bar{P}^{\frac{h(t)}{\bar{h}}} \quad (22)$$

で表される。どの劣化状態にあっても、取替を実施した場合は、その次の期にはレベル1の状態に確率1で移るものとする。そのため、取替を実施した場合は、行列

$$P^{\infty} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

で状態が推移する。取替の実施と見送りに応じて状態推移確率がスイッチするように、これらの行列の (i, j) 要素と $u_i(t)$ を用いて

$$Q_{ij} = (1 - u_i(t)) P_{ij}^o(t) + u_i(t) P_{ij}^{\infty} \quad (24)$$

for all $i, j \in \{1, \dots, 4\}$

と表す。この時、最適取替えルールはSDPモデル

$$\max_{(u_i(t))_{i \in \{1, \dots, 4\}, t \in \{1, \dots, 40\}}} E_{i(t)} \left(\sum_{t \in \{1, \dots, 40\}} \beta^{t-1} \pi_i(t) \right) \quad (25)$$

の解として表せる。 $E_{i(t)}[\cdot]$ は状態変数 $i(t)$ の推移に関するすべてのサンプルパスに対する期待値を表す。この問題のBellman方程式⁴⁶⁾は

$$\begin{aligned} V_i(t) &= \max_{u_i(t) \in \{0, 1\}} \left\{ \bar{b} R_i h(t) - \bar{c} - (\bar{b} l_i h(t) + C_i) u_i(t) \right. \\ &\quad \left. + \beta \sum_{j=1}^4 Q_{ij}(u_i(t)) V_j(t+1) \right\} \text{ for all } i \in \{1, \dots, 4\} \end{aligned} \quad (26)$$

と表せる。この問題は $u_i(t)(i \in \{1, \dots, 4\}, t \in \{1, \dots, 40\})$ について線形であり、偏微分係数

$$\frac{\partial V_i(t)}{\partial u_i(t)} = -(\bar{b} l_i h(t) + C_i) + \beta \sum_j (-P_{ij}^o(t) + P_{ij}^{\infty}) V_j(t+1) \quad (27)$$

の符号に応じて $u_i(t)$ が決定される。

$$u_i(t) = \begin{cases} 0 & \text{if } \frac{\partial V_i(t)}{\partial u_i(t)} \leq 0 \\ 1 & \text{if } \frac{\partial V_i(t)}{\partial u_i(t)} > 0 \end{cases} \quad (28)$$

for all $i \in \{1, \dots, 4\}, t \in \{1, \dots, 40\}$

(3) 数値計算事例

簡単な数値計算事例を考え最適取替えルールを求めてみよう。いま、SDP モデル(26)のパラメータを表-2 のように設定しよう。最適取替えルールはパラメータ値に敏感に依存しており、パラメータ値を変化させることにより多様な取り替えルールが導出できる。図-1 は、将来交通量の伸び率をゼロとして、どの期においても交通量は一定であるとしたベンチマークケースの計算事例を示している。交通量が一定であるため、劣化の推移確率はどの期においても同じマルコフ行列に従う。この場合には、どの期においても、状態が劣化レベル 2 以上になれば直ちに取替るというルールが得られる。すなわち、取り替えルールは時間不变なルールになる。

つぎに、交通量は初期時点より 3% の割合で増加するが、ある時点で交通量の増加がとまり、それ以降一定に推移するケースを考えよう。さらに、取替工事費を上のベンチマークケースよりもそれぞれの状

表-2 計算例での変数設定

(a) 劣化状態別数値

劣化状態 $i(t)$	信頼性 R_i	取替による使用不能日数割合 l_i	取替工事費用(万円) C_i [定常]	取替工事費用(万円) C_i [時間依存]
1	0.9	0.001	100	700
2	0.5	0.001	210	1700
3	0.3	0.001	360	2800
4	0.01	0.001	450	3500

(b) その他数値

単位交通当たり利用者便益 (円/大型車)	初期年間大型車交通量 (百万台) $h(0)$	社会的割引因子 β
20300	200	0.96

(c) 劣化プロセス

マルコフ行列 \bar{P} (年間大型車 100 万台当り)				
$\bar{P} = \begin{bmatrix} 0.955 & 0.045 & 0 & 0 \\ 0 & 0.977 & 0.023 & 0 \\ 0 & 0 & 0.987 & 0.013 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$				

交通量伸び率 = 0

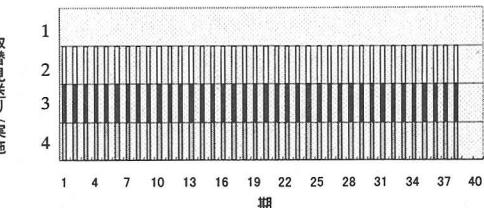


図-1 計算事例(定常ルール)

交通量伸率=3% 取替え工事費増

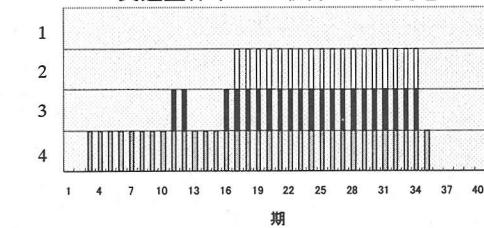


図-2 計算事例(時間依存ルール)

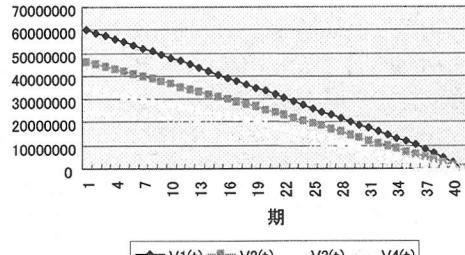


図-3 最適値関数

態においておおよそ 7 倍ほど大きく設定している。本ケースの場合、交通量が比較的小ない早い時期においては、レベル 4 になれば取替るというルールが得られる。しかし、交通量が増加した段階においては、初期段階よりも劣化が進行する確率が大きくなる。したがって、レベル 2 以上に到達すれば直ちに部材を取替ることが必要になる。レベル 4 が「放置できない破損レベル」を表していると考えよう。以上の計算結果によれば、初期段階では破損を認知した場合に補修を行うという Corrective Maintenance ルールが得られる。しかし、将来時点では、破損に至る前にレベル 2 の段階で予防的に補修するという Preventive Maintenance ルールを採用することが望ましくなる。将来時点では、構造部材の劣化状態がたとえレベル 2 であることが確認されても、利用交通量が多いため、つぎの期には劣化が著しく進行する可能性が大きい。したがって、部材の損傷がもたらす損失額が十分大きければ、予防的に補修を行うこと

が効率的となる。このように本章で示した単純なモデルにおいてさえ、将来の外的環境に応じて取替ルールを適応させるような時間依存的取替ルールを得ることができる。図-2のケースについて Bellman 方程式で定義される最適値関数の値を示したのが図-3である。最適関数値は、その期以降の各期に道路橋がもたらす社会的純便益をストック化したものであり、その期における道路橋の社会的資産価値を表していると解釈できる。ある期において、劣化が進んでいれば資産価値は低く、補修を行ってレベル1の状態に戻れば資産価値が高くなることが見て取れる。補修を行って劣化を回避することが資産価値のタームで見て社会的に望ましいことが示されている。

以上の数値計算事例でも明らかなように、SDP モデルは適用範囲も広く、モデルの構造が直観的に理解しやすいという特徴を持っている。一方で、状態変数や政策変数の数が多くなると推移行列の次元が極端に大きくなり、解法に工夫する必要が生じる。また、修繕/更新戦略の経済学的な解釈が困難となる場合もある。計算負荷の軽減や経済学的な解釈が可能な分析を実施するためには、前章で紹介したような SIC モデルや本特集でとりあげた竹林論文⁴⁷⁾、慈道・小林論文³⁷⁾のように新しいタイプのモデルの開発に果敢に取り組むことが重要である。

5. IM の高度化のための研究課題

(1) プロジェクト会計システム

従来より、プロジェクト評価において事業採算性の観点から事前評価の一部として財務分析が行われ、そのために財務諸表も作成されてきた。伝統的な財務分析は、割引現在価値や内部収益率を評価指標とした Discounted Cash Flow 法を中心である。そのため、損益計算書(Profit and Loss Statement: PL)の作成を中心としており、貸借対照表(Balance Sheet: BS)を中心としたストックベースでプロジェクトの財務評価を実施することは一般的ではなかった。既に述べたように、インフラ・ストックの経済価値はプロジェクトライフを通じてインフラの状態変数を最適に制御することを前提として評価される。特に、SIC 問題ではインフラの維持/更新が最適ルールに従って実施される場合、インフラの資産価値が最適値関数として導出される。このようにインフラの資産価値が求めれば、それを用いて各期の BS を作成することが可能である⁴⁷⁾。このような考え方で作成された BS は、将来にわたって IM を遂行していく上でマネジメントが

適切に行われているかどうかを経済・財務的な観点から検討するための参照点としての役割を果たす。本研究ではプロジェクトライフを通じてインフラの資産価値を計測し、それに基づいて望ましい IM 戦略を検討するシステムをプロジェクト会計システムと呼ぶ。

インフラが公共目的のもとに整備/運営されるものである限り、プロジェクト会計システムは民間主体による収益事業のような私的経済価値の範囲をカバーするだけでなく、社会的な経済価値までもカバーしたものでなくてはならない。キャッシュフローとして実現しないような社会的便益/費用を推定する方法は多数開発されており、既に費用便益分析のために適用されている。従って、直ちに出てくる非常に自然な発想として、それらの方法で推定された社会的便益/費用を従来の会計における実際のキャッシュフローに含めて考えることで対応できる。この発想は、宮本他⁴⁸⁾にも見られる。

従来の費用便益分析では、プロジェクトライフを設定し、それに対応して発生する社会的便益/費用のフローに基づいて投資判定を行ってきた。その場合、インフラ整備のプロジェクトライフとして一般的には物理的寿命に従って設定されてきた。しかし、IM のためのプロジェクト会計を設計する上で問題となるのは、終了時点の設定である。実際には当初想定した耐用年数を経ないで機能向上のために更新が行われる場合が多数ある。また、耐用年数が過ぎた場合にも維持/更新あるいは更新によりサービスの提供が継続されるのが一般的である。したがって、耐用年数を根拠としてプロジェクトライフを設定するよりも、インフラ全体を修復系と考えプロジェクトライフを無限期間で把握した方が理論的には望ましい。ただし、十分長い将来のプロジェクト便益/費用の割引現在価値は無視しうるため、実用的には十分に長いプロジェクトライフを設定し終末残存価値をゼロとおくことで対処可能であろう。

プロジェクト遂行中には事前に予想できない事象が発生する。実際に実行された行動の結果として実現した資産や負債額に基づいて、各期ごとに実績ベースの BS を作成することができる。ある期において、それ以後のスケジュールを SIC のフレームで見直す場合には、実績ベースの BS が状態変数の初期値を与えることになり、それを通じて、既に実行された過去の行動はそれ以後の IM に反映されていく。ある期において、事前に作成した BS と実績ベースの BS が著しく異なる場合が生じる。厳密に言えば、事前の BS は不確実性を含む外的な環境を反映しており、BS の中に含まれる各状態変数は確率変数である。従つ

て、どの実績ベースの BS も事前の BS の集合に含まれており、その中からある確率で実現し得ることになる。ある実績ベースの BS が事前の BS から生じる確率が非常に小さいものである場合、あるいは実現しないものである場合には、事前の BS スケジュールの作成方法に問題があった可能性があり、BS スケジュールを修正する必要⁴⁹⁾がある。このようなプロジェクト会計システムに関してはほとんど研究の蓄積がなく、IM を効果的に実施するためのプロジェクト会計システムに関する研究が重要課題となっている。

(2) IMを取り巻く制度とその設計

IM の意思決定者は責任主体としては単独であっても、それを取り巻く制度を介して複数の主体が関与する。もし、複数の主体がそれぞれ分権的に意思決定を行う余地がある場合には、ある主体が解くべき IM 問題に含まれるパラメータは、他の主体のそれらと相互依存関係を持つことになる。3. で定式化した SIC モデルは、マネージャが集権的な立場で、あるいは外的環境(自然)を相手として 1 人ゲームをプレイしていく中で、自己に課したルールである。それに対して、広義の IM 問題では、個々の主体が遵守すべきルールはより複雑となる、互いに相手の行動を拘束しあうものとして機能する。このようなルールは、事前に契約あるいは法律の形で正式に記述されなければならない。

インフラの最終的な所有者/責任主体は公共であっても、建設から運営・維持/管理の各段階は契約に基づいて民間主体に委託される場合が多数ある。経済学では、このような関係を依頼人－代理人関係(principal-agent)⁵⁰⁾としてモデル化して、契約の設計問題を分析した例が多数蓄積されている。近年では、将来生起する状態に応じて、契約者双方が取るべき行動を全て列挙して契約に書き込みきれないという意味で、契約が完備ではない場合を分析する不完備契約理論⁵¹⁾⁻⁵³⁾が発展しつつある。このような不完備契約に関しては、既に小林・大本^{54), 55)}等が建設工事における請負契約の設計モデルや紛争解決モデルを提案し、外部的オプション(仲裁や裁判)の利用可能性、第 3 者の介入、所有権、再交渉のルールなどの制度的メカニズムがゲームの均衡解に及ぼす影響を分析している。

不完備契約においては、契約遂行上生じた紛争を解決する上で、紛争の原因となっている契約事項の内容を当事者以外の第三者が客観的に確認することが可能かどうかが問題となる。しかし、IM に付随する多くの不確定要因や投資内容は契約の中に具体的な契約事項として明記されていない。また、専門家

でない第三者が不確定要因の実現値を客観的に観測できない場合も少なくない。この場合、裁判所や第三者がこれらの実現値に基づいて紛争を仲裁することが困難となる。このような要因は観察可能であるが立証不可能(unverifiable)であると呼ばれる⁵¹⁾。契約にこのような要因が含まれている場合、相手が実施した投資結果を戦略的に利用し、自己に有利なように故意に契約違反を行うホールドアップ問題⁵²⁾や、自己にとって不利益をもたらすような情報を秘匿しようとするモラルハザード⁵³⁾が生じる危険性がある。この場合、契約を遵守することが契約当事者にとって最適となるように契約を設計することにより、ホールドアップ問題やモラルハザードを回避するような制度を設計する必要がある。今後、多様な契約形態に基づく IM を実現するためには、以上で述べた制度設計が重要な研究課題となる。

6. おわりに

本稿では、最適維持/更新問題のプロトタイプを SIC モデルとして定式化することにより、狭義の意味における IM 問題の基本的な研究課題について筆者らの見解を示した。本特集でとりあげた各論文は、いずれも狭義に意味における IM 研究のフロンティアを構成するものであり、今後の IM 研究の方向性を示唆していると考える。本稿では、これらの論文で明らかになった知見を踏まえて今後に残された研究課題について考察したものである。もとより、IM 研究は最適維持/更新問題だけでなく、IM に関わる広範な内容を取り扱う必要がある。このような広義の意味における IM 研究に関しては、ほとんど研究が進展していないのが実状である。本稿では、このような広義の意味における IM 研究の課題の中から、プロジェクト会計、制度的メカニズム設計をとりあげ、今後の研究課題について考察した。本稿および本特集が今後の IM 研究の発展に寄与しうる点があれば、筆者らの望外の幸せである。

参考文献

- 1) 多田宏行編: 語り継ぐ舗装技術-道路舗装の設計・施工・保全-, 鹿島出版会, 2000.
- 2) 高橋宏直、横田弘: 港湾施設の維持補修費の推計モデル構築および将来動向の推計、土木学会論文集, No.679/VI-51, pp.135-140, 2001.
- 3) Aven, T. and Jensen, U.: Stochastic Models in Reliability, Springer, 1999.

- 4) 埴見弘: 信頼性工学入門, 丸善株式会社, 2001.
- 5) Rigdon, S. E. and Basu, A.P.: Statistical Methods for the Reliability of Repairable Systems, Wiley- Interscience, 2000.
- 6) Gertsbakh, I.: Reliability Theory with Applications to Preventive Maintenance, Springer, 2000.
- 7) Blischke, W.R. and Murthy, D.N.P.: Reliability, Wiley, 2000.
- 8) DeGarmo, E.P., Sullivan, W., and Bontadelli, J.: Engineering Economy, 8th eds, Maxwell Macmillan, 1989.
- 9) Young, D.: Modern Engineering Economy, Wiley, 1993.
- 10) Steiner, H.M.: Engineering Economic Principles, 2nd eds., MacGraw-Hill, 1996.
- 11) Canada, J.R., Sullivan W.G and White J.A.: Capital Investment Analysis for Engineering and Management (2nd eds.), Prentice Hall, 1996.
- 12) Park C. S.: Contemporary Engineering Economics, 2nd eds., Addison Wesley, 1997.
- 13) Sullivan, W.G., Bontadelli, J.A. and Wicks, E.M.: Engineering Economy, Prentice Hall, 1997.
- 14) Collier, C.A. and Glagola, C.R.: Engineering Economics and Cost Analysis, Prentice Hall, 1998.
- 15) White, J.A.: Principles of Engineering Economic Analysis, 4th eds., Wiley, 1998.
- 16) Bowman, M.S.: Applied Economic Analysis for Technologists, Engineers and Managers, Prentice Hall, 1999.
- 17) Newman, D.G., Lavelle, J.P. and Eschenbach, T.G.: Engineering Economic (8th eds), Engineering Press, 2000.
- 18) Thuensen G.J. and Fabrycky, W.J.: Engineering Economy (9th eds.), Prentice Hall, 2001.
- 19) Vajpayee, S.K.: Fundamentals of Economics for Engineering Technologists and Engineers, Prentice Hall, 2001.
- 20) 三木千寿: 社会基盤の長寿命化に向けた維持管理技術の動向, 土木学会誌, Vol.85, No.2, pp. 5-6, 2000.
- 21) Beichelt, F.E. and Fatti, L.P.: Stochastic Processes and Their Applications, Taylor & Francis, 2002.
- 22) Jones, P.W. and Smith, P.: Stochastic Processes: An Introduction, Arnold, 2001.
- 23) Ross, S.: Stochastic Processes (2nd eds.), Wiley, 1996.
- 24) 土木学会 : 構造物のライフタイムリスクの評価, 構造工学シリーズ2, 土木学会, 1989.
- 25) 尾坂芳夫, 高岡宣善, 星谷勝: 土木構造設計法, 新体系土木工学12, 技報堂出版, 1981.
- 26) 若林拓史: 阪神大震災における道路網連結信頼性と確率重要度による重要区間の評価, 土木計画学研究・論文集, No.13, pp.391-400, 1996.
- 27) 能島暢呂: 道路交通ネットワークの地震時機能評価モデルの開発, 第3回都市直下地震災害総合シンポジウム, 10, pp.513-516, 1998.
- 28) 高橋清他: 全国交通ネットワークにおける地震発生リスクのリンク及びリンク交通量への影響評価, 土木計画学研究・論文集, No.15, pp. 345-250, 1998.
- 29) 上田孝行: 社会基盤施設のライフサイクル評価手法, 東京工業大学土木工学科研究報告, No.63, pp.121-135, 2001.
- 30) Merton, R. C.: Continuous Time Finance, Basil Blackwell, 1990.
- 31) van Moerbeke, P.I.J.: On optimal stopping and free boundary problem, Arch. rational mech. Anal., Vol. 60, pp. 101-148, 1976.
- 32) Bensoussan, A. and Lions, J. L.: Impulse Control and Quasi-Varuational Inequalities, Gauthier-Villars, 1984.
- 33) Dixit, A. and Pindyck, R.S.: Investment under Uncertainty, Princeton University press, 1993.
- 34) 栗野盛光, 小林潔司, 渡辺晴彦: 不確実性下における最適補修投資ルール, 土木学会論文集, No.667/IV-50, pp.1-14, 2001.
- 35) Dixit, A.: The Art of Smooth Pasting, Harwood Academic Publishers, 1993.
- 36) 田村謙介, 小林潔司: 不確実性下における道路舗装の修繕ルールに関する研究, 土木計画学論文集, No.18, pp.97-107, 2001.
- 37) 慈道充, 小林潔司: 不確実性下における最適点検・修繕ルール, (本特集論文).
- 38) 例えば, Baxter, M. and Rennie, A.: Fundamental Calculus: An Introduction to Derivative Pricing, Cambridge University Press, 1996.
- 39) 貝戸清之, 阿部允, 藤野陽三: 実測データに基づく構造物の劣化予測, (本特集論文).
- 40) Madanat, S.M. and Guillaumot, V.C.: Inspection, Prediction and Decision-Making in Infrastructure management; Framework, Models and Computation (本特集論文).
- 41) 鉄道総合研究所, 鋼構造物補修・補強・改造の手引き, (財)鉄道総合研究所, 1992.
- 42) 土木学会コンクリート委員会, コンクリート標準示方書[維持管理編], 土木学会, 2001.
- 43) Hudson, W.R., Hass, R. and Uddin, W.: Infrastructure Management: Integrating Design, Construction, Maintenance, Rehabilitation and Renovation, McGraw-Hill, 1997 (笠原篤他訳: 社会資本マネジメント・維持管理・更新時代の新戦略-, 森北出版, 2001).
- 44) 吉見秀夫: 米国の効率的な道路資産管理(アセットマネジメント)に向けての動き, 高速道路と自動車, Vol.43, No.8, pp.59-63, 2002.
- 45) 木本由花, 上田孝行: 確率過程に着目した道路橋の維持・更新, 土木学会第57回年次学術講演会・概要集(CD-R), 2002.
- 46) Judd, K. L.: Numerical Methods in Economics, MIT Press, 1998.

- 47) 竹林幹雄：離発着回数と滑走路舗装劣化との相互作用を考慮した複数滑走路の最適維持補修計画（本特集論文）。
- 48) 宮本和明, 北詰恵一, 石川崇之: 企業会計の手法を用いた公共事業遅延による費用の評価, 土木計画学研究・講演集, No.24(CD-R), 2001.
- 49) 野上圭介, 上田孝行: 公的会計によるプロジェクト・マネジメント, 土木学会第57回年次学術講演会・概要集(CD-R), 2002.
- 50) たとえば, Laffont, J.-J. and Martimort, D.: *The Theory of Incentives*, Princeton University Press, 2002.
- 51) Hart, O.: *Firms, Contracts, and Financial Structure*, Oxford University Press, 1995.
- 52) 柳川範之: 契約と組織の経済学, 東洋経済新報社, 2000.
- 53) Salani'e, B.: *The Economics of Contracts: A Primer*, The MIT Press, 1997, 細江守紀他訳：契約の経済学, 効率書房, 1997.
- 54) 小林潔司, 大本俊彦, 横松宗太, 若公崇敏: 建設請負契約の構造と社会的効率性, 土木学会論文集, No. 688/IV-53, pp.89-100, 2001.
- 55) 大本俊彦, 小林潔司, 若公崇敏: 建設請負契約におけるリスク分担, 土木学会論文集, No. 693 /VI53, pp.205-217, 2001.
- 56) 大本俊彦, 小林潔司, 大西正光: 建設契約紛争における和解と仲裁, 土木学会論文集, No.693 /VI53, pp.231-243, 2001.

(2002. 11. 13 受付)

PERSPECTIVES AND RESEARCH AGENDAS OF INFRASTRUCTURE MANAGEMENT

Kiyoshi KOBAYASHI and Takayuki UEDA

This paper overviews traditional approaches in engineering economics and reliability engineering to maintenance and replacement and examines their applicability to infrastructure management. Problem of infrastructure management is formalized as a general stochastic impulse control (SIC) model and then a way for solving it is instructed. As a special case of the problem, the discrete stochastic dynamic programming (SDP) is illustrated with its application to replacement of an infrastructure. Finally, the research agendas for the methodological development of infrastructure management, particularly topics in project accounting system, mechanism design are discussed in perspective view.