

ロジックモデルを用いた都市高速道路の 維持管理マネジメントに関する研究

2009 年 8 月

坂井康人

目 次

第1章 序 論	1
1.1 緒言	1
1.2 都市高速道路の現状	4
1.3 顧客満足と維持管理効率化に向けた取り組みの必要性	7
1.3.1 現状の課題と新しい維持管理体系の構築	7
1.3.2 新しい維持管理体系の構築目的	8
1.3.3 従来と現在および将来の維持管理体系	9
1.3.4 顧客満足型アセットマネジメントのマネジメントサイクル	11
1.4 本論文の構成	12
第2章 ロジックモデルの構築と各指標値の設定	17
2.1 緒言	17
2.2 行政経営マネジメントシステムとロジックモデル	18
2.2.1 行政経営マネジメントの重要性	18
2.2.2 都市高速における経営マネジメントとロジックモデルの概要	23
2.2.3 ロジックモデルの構築	28
2.2.4 業績評価計画の策定	30
2.2.5 評価指標値の設定	33
2.3 結言	41
第3章 ロジックモデルに基づくリスク評価による管理水準設定	44
3.1 緒言	44
3.2 リスクマネジメントと内部統制論	45
3.2.1 リスクマネジメントの概要	45
3.2.2 内部統制論	46
3.2.3 リスクマネジメントと内部統制構築の必要性	47
3.3 維持管理業務におけるリスクマネジメント	49
3.4 管理水準の設定方法	51

3.5	リスク適正化の方法	52
3.6	日常点検（路上）の評価	53
3.7	日常点検（路下）の評価	56
3.8	結言	60
第4章	ブリッジマネジメントシステムを用いた管理手法	63
4.1	緒言	63
4.2	都市高速道路における橋梁マネジメントシステム	64
4.3	舗装の最適補修計画の検討	66
4.3.1	劣化モデルの推定方法	66
4.3.2	最適管理水準の設定	69
4.3.3	補修優先順位の決定	72
4.3.4	同時施工の検討	76
4.4	本体構造物における最適補修計画の検討	82
4.4.1	劣化の時間依存性検討	82
4.4.2	不確実性を考慮した確率モデルの提案	87
4.4.3	相対評価モデルを用いた補修優先順位の検討	89
4.5	結言	93
第5章	都市高速における維持管理マネジメントの枠組み	98
5.1	緒言	98
5.2	内部統制を考慮した業務プロセスの構築	99
5.2.1	ロジックモデルに基づく戦略的維持管理	99
5.2.2	経営マネジメント	102
5.2.3	リスク評価に基づく財務分析	104
5.2.4	実施マネジメント	111
5.3	結言	113
第6章	結論	116

第1章

序論

1.1 緒言

わが国では、戦後の国土復興、生活水準の確保、国土の均衡ある発展等の様々な時代背景を受けて、一貫して社会資本整備が進められ、地域格差や質的な課題は残るものの、一定の水準は確保されてきた。

社会資本の建設と更新は、1960～1970年代の高度成長期をピークとして以後は減少傾向にあり、全体としての社会資本のストックの高齢化が進みつつあり、これから数十年後に集中的に老朽化するため、その維持、管理、更新費用が急激に増加することが予想される。

こうした危機感がわが国の社会資本整備の関係者にも広がり、先に社会資本の老朽化を経験した欧米等の先進国に学ぼうという機運が高まった。欧米では、社会資本のストックを「資産」（アセット）とみなして民間の企業経営等で用いられるマネジメント手法を活用している[1]。

わが国においても様々な取り組みが行われており、国、地方公共団体等における行政マネジメントの仕組みは、従来、決められた政策を実行するための管理に主眼がおかれ、マネジメント（経営）の視点は弱いものであったが、先進的な地方自治体においては公共経営（パブリックマネジメント）の観点から、効率性の高い行政マネジメントの仕組みを導入している自治体もある。構築すべきアセットマネジメントの仕組みは、同じコンセプトに基づくものである。

アセットマネジメントの定義は必ずしも定まっているものではない。例えば、「道路構造物の今後の管理・更新のあり方に関する検討委員会」による提言によれば、アセットマネジメントとは「道路を資産としてとらえ、構造物全体の状態を定量的に把握、評価し、中長期的な予測を行うとともに、予算制約の中で、いつどのような対策を行うのが最適であるかを決定できる総合的なマネジメント」と定義されている[2]。

一方、欧米等諸外国のアセットマネジメント先進事例として、米国連邦道路庁（FHWA）ではアセットマネジメントを、「コスト効率よく、物理的資産（Physical Asset）を維持し（maintaining）、機能を向上し（upgrading）、運用する（operating）、体系化したプロセスである。それは工学的な考え方を、しっか

りした実務の手法や経済的な理論と組み合わせ、そして、意志決定に向けた組織的、論理的なアプローチを容易にするツールを提供する。このようにして、アセットマネジメントは、短期計画、長期計画の両方を取り扱うフレームワークを提供する」と定義している。

例えば、社会資本におけるアセットマネジメントを民間企業に例えるなら、国、地方公共団体等の公的機関は、国民、住民、利用者という株主から委託された資本（税金等）を投下して、社会資本という資産を形成することを任されている経営者に相当する。すなわち、公共機関は投下資本によって形成した資産を良好な状態に維持管理し、効果的、効率的に運営し、サービス目標という資産価値を増大すべく運用することを期待している。

アセットマネジメントは顧客にとっての「成果」に着目しており、社会資本資産を有効に運用管理することにより、もたらされる効果を最大化するために行うマネジメントととらえることができる。

このマネジメントシステムは、施設資産に人員や資金等を投資し管理を行い、施設資産の維持、向上とサービスのパフォーマンスの向上を継続的に計ることを目標とする。その方法は、組織全体で整合性のとれた意志決定がなされるように、データに基づき、パフォーマンス（成果）を測定し、改善するものでなければならない。その評価指標は、住民、利用者等のニーズに基づく「資産価値」であるべきである。このように客観性や実用性を重視した目標管理の仕組みが求められている。

社会資本の適切な維持管理を行うためには、第1に維持管理の効率化を目指すべく、施設の現況を示す台帳等を整備し、その最新の状態を記録しておく必要がある。しかし、多くの機関では点検が十分に行われていないだけでなく台帳すら整備されていない機関も多く見受けられる。また、設計図書、竣工図面、補修履歴等の施設情報も喪失していることが多い。例えば、「道路橋の予防保全に向けた有識者会議」では、わが国の道路橋保全の実態として、点検、診断、補修補強の信頼性が十分に確保されていないこと、高度な専門知識を必要とする損傷事例に対応する体制が整備されていないこと、市区町村では約9割の自治体が定期的な道路橋点検を実施していないこと等、道路橋を適切に保全する観点から多くの課題を抱えている実態が判明するとともに、このような状況に鑑み、道路橋の予防保全（早期発見、早期対策で国民の安全安心とネットワークの信頼性を確保するとともに、ライフサイクルコスト（以下、LCC という）の最小化と構造物の長寿命化を図ること）の実現のため、1) 点検の制度化、2) 点検および診断の信頼性の確保、3) 技術開発の推進、4) 技術拠点の整備、5) データベースの構築といった5つの方策を提言している[3]。

アセットマネジメントの第1歩は、施設に関する情報を収集、蓄積することである。なお、個々で重要なのはどのようにデータを収集し、効率的に活用するかである。データベース等情報システムはそのためのツールとして位置づけられる。また、維持管理計画の基本は手遅れにならない時期に劣化現象等を予測し、予防保全も含めた適切な維持修繕を行うことである。そのことで傷んだ状態で対策を施すより中長期的にコストが大幅に縮小し、かつ良好なサービスを提供できることが知られている。しかしな

がら、一時期に修繕、更新が集中すると予算制約の中で実施困難となるので、維持管理計画を策定し、予算制約を念頭において施設の延命化、計画的な修繕、更新に着手する必要がある。その際、予算の確保、明確な優先順位、管理水準等を明確にしておくことが重要である。さらに、昨今の厳しい財政事情により、多くの行政組織では人員削減の傾向にある。他方で、構造物の老朽化、苦情や要望の増加、住民参加型の事業執行等、現場での業務量は増加傾向にある。そこで、これまで以上に効率的な執行体制を構築し、限られた予算、職員の制約下で所定のサービス水準を保つことが重要な課題となる。

第2に維持管理については、物理的資産として対応する側面と補修に基づくサービス向上等の運用面がある。このうち物理的な面については工学的な知識としてすでに相当の蓄積があるが、運用面については手法等について体系化が必ずしも十分ではない。

そこで、住民、利用者のニーズに基づくサービス水準の設定が必要である。国民が行政サービスの顧客であり、行政の責務は顧客ニーズを反映した行政運営を行うことにある。このことから、顧客ニーズは意思決定プロセスに反映されなければならない。さらに、業績測定あるいは事業評価において、わかりやすい指標を活用することに心がけ、議会や住民、利用者によって容易に監視できるシステムを作らなければならない。また、意思決定を行ううえでプロセスの透明化とその説明責任を果たす必要がある。

行政目的を達成するためには、政策、施策、事業という3段階がある。政策、施策レベルの内容は、行政組織の総合計画等で明記されており、行政が提示する政策と計画の策定根拠となり、それらの全体調整と体系化を図る役割が期待されている。

アセットマネジメントの成果を事業レベルで評価するためには、図1-1に示すようにアウトカム指標として社会の潜在的需要を反映させることが望ましい。ここで強調したいのは、関係する行政サービスの中で公共資産をどのように維持管理し潜在的な機能をどのように生かすのかを住民、利用者等にわかりやすく示し、意思決定に反映させる仕組みが「義務」として求められていることである。

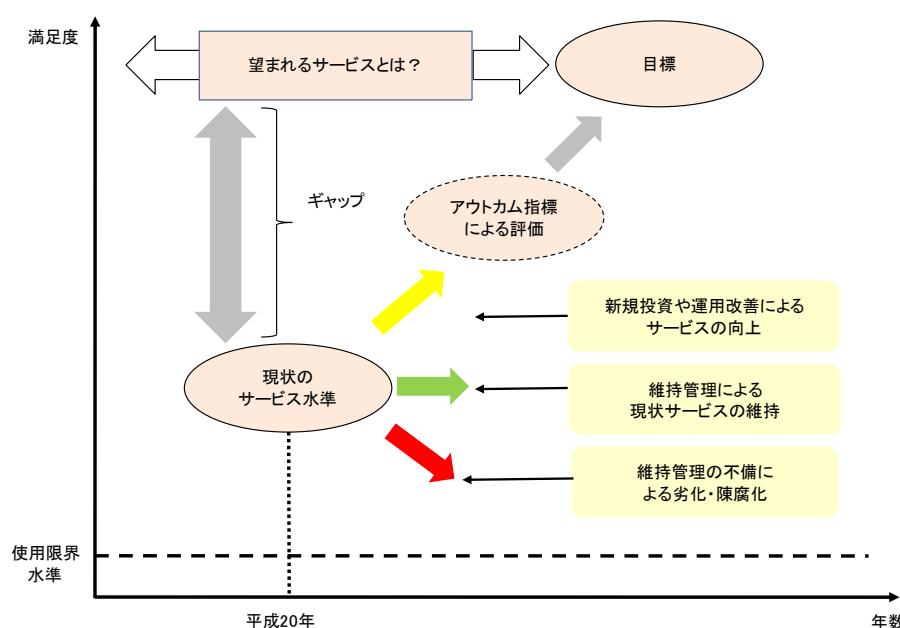


図1-1 アセットマネジメントにおける目標管理と計画との連動イメージ

本研究では、アセットマネジメントを実用化に向けて、供用から長期間にわたり日常的に重交通を有し、構造物の老朽化の進行の課題に直面している都市高速道路に着目し、阪神高速道路を例として維持管理マネジメント手法について検討する。具体的には、企業における内部統制論とリスクマネジメントに着目し、阪神高速維持管理ロジックモデル（Hanshin Expressway Logic Model：以下、HELMという）並びに阪神高速ブリッジマネジメントシステム（Hanshin Expressway Bridge Management System：以下、H-BMSという）を用いた戦略的な維持管理のための方法論について提案するものである。

HELMについては、維持管理業務のうち、LCC等による工学的評価が困難な「清掃」、「保守点検」業務を対象とするとともに、土木施設の本体構造物の補修をも含む総合的な内容となっており、各々の活動の実施が期待する成果へ至る過程を把握し、定量的な指標、管理水準を設定することで、個々の業務の業績達成度を評価し、最適な規模（頻度、体制）を提示するツールとして提案する。

一方、H-BMSについては、LCC等による工学的評価が可能な構造物管理として、将来の劣化予測、構造物における機能水準、LCCの分析等の工学的評価により、最適な工事規模（予算、優先順位）を提示することにより維持補修計画の支援システムとして提案する。

1.2 都市高速道路の現状

わが国における道路橋は、戦後の国土復興の中で自動車交通の重要性が国民にも認識され、1950年代に始まる高度経済成長期を中心にして大量に建設され、わが国の経済成長と国民生活の向上に大きな役割を果たしてきた。1950年代後半には有料制による高速道路、都市高速道路の整備が始まり、日本道路公団（1956年）が設立され、本格的なモータリゼーションの時代が到来した。日本道路公団の設立により、従来、国が一般国道につき直轄で施工していた有料道路の建設方式は廃止されて、公団による建設方式が採用されることになった。続いて、首都圏および京阪神圏において慢性的な渋滞解消を図るべく、自動車専用道路網を構成して交通の円滑化を図り、都市機能の維持、増進に資することを目的として、首都高速道路公団（1959年）、阪神高速道路公団（1962年）が設立されて、それぞれの都市高速道路の建設にあたることになり、さらに1970年には「地方道路公社法」が成立し、地方的な幹線有料道路の建設にあたる地方道路公社の設立が認められるようになった。福岡、広島、名古屋都市圏において道路公社が設立された。また、同年には本州四国連絡橋公団も設立されている。

その後、道路関係四公団は2005年10月より民営化され、今後は5年毎に独立行政法人日本高速道路保有機構（以下、機構という）との協定締結が求められることになった。

高速自動車国道については、当時の日本道路公団により1963年7月に名神高速道路尼崎～栗東間71kmが開通、1965年7月には名神高速道路の全線190kmが、さらに1969年5月には東名高速道路の全線347kmが、それぞれ開通した。その後も21世紀初頭に国土開発幹線自動車11,520kmの供用を図ることを目途に

高速自動車国道の建設および供用は着々と進行し、今日では供用延長は約7,000kmに達している。

一方、都市高速道路については、高度経済成長期に首都圏においては首都高速道路公団、京阪神圏においては阪神高速道路公団により都心部における環状道路網等、現在の骨格となる路線が整備が進められ、高速自動車国道との接続道路やさらに平成期に入ると湾岸道路等が整備される等の充実が図られた。

その結果、現在、地方公社まで含めた都市高速道路の供用延長は約710km、そのうち首都圏、京阪神圏の重責を担う首都高速道路並びに阪神高速道路の供用延長はそれぞれ約290km、240km、1日平均の利用台数はそれぞれ約115万台、約90万台となっている。これらの道路橋は、建設後40年～50年が経過することになり、劣化損傷が多発する危険性は高まってきている。

一方、道路橋に要求される性能は、兵庫県南部地震等の大規模な地震被害を教訓にした耐震性能化や物流効率化（車両の大型化）のための設計自動車荷重引き上げへの対応等、ますます高まるばかりである。特に、首都高速道路、阪神高速道路は、まさに首都圏、京阪神都市圏の道路網において中核的な役割を演じているが、高度経済成長期に建設された都心環状線を中心として施設の維持補修に対するニーズは着実に増加している。

都市高速道路における構造物の特徴として、主な構造としては橋梁構造であり、例えば、図1-2は都市高速道路である阪神高速道路と高速自動車国道との構造種別を比較したものであるが、橋梁構造が阪神高速道路の構造種別総延長のうち約90%を占めている。これは、都市高速道路の特徴として、都市内においては高速道路用地の取得が容易でなく、既存の街路や水路等の上空を利用した連続高架橋が中心になっているためである。その結果、土工区間が占める割合が多い都市間高速道路に比べ、都市高速道路の単位距離当たりの維持管理費が高むこととなる。

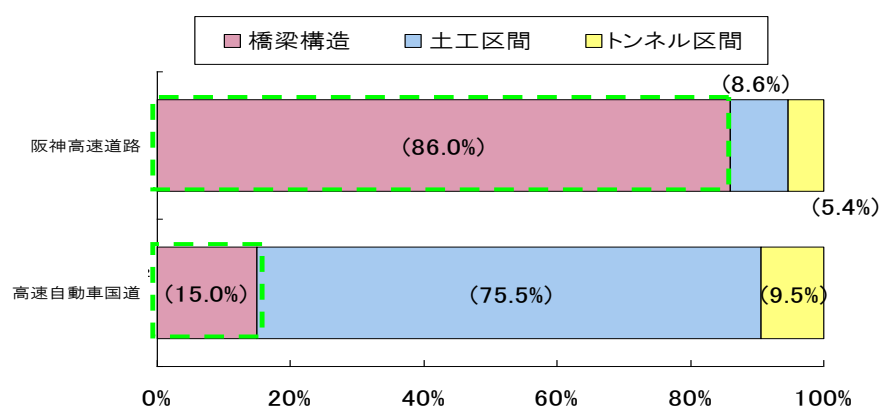


図1-2 阪神高速道路の構造種別（平成21年4月現在）

供用年数	供用延長(km)					合計	経年別割合
	首都高速	阪神高速	名古屋高速	福岡・北九州 高速	広島高速		
0年～10年未満	39.0	20.8	29.5	35.5	14.0	138.8	19.2%
10年～20年未満	55.0	77.7	7.3	15.9		155.9	21.6%
20年～30年未満	69.0	51.4	32.4	24.9		177.7	24.6%
30年～40年未満	71.0	53.5		15.8		140.3	19.5%
40年以上	61.0	38.6		9.2		108.8	15.1%
合計	295.0	242.0	69.2	101.3	14.0	721.5	

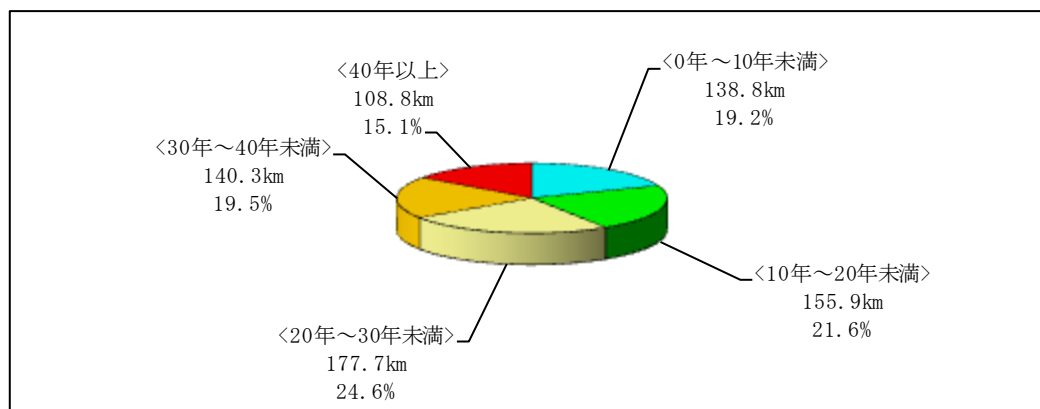


図1-3 都市高速道路における供用からの経過年数 (平成21年4月現在)

また、構造物の高齢化も維持管理のうえで重要な課題である。図1-3は全国における都市高速道路の経年別供用延長を示しているが、現在供用後30年以上の構造物も40%近く占めている。最近になり、鋼橋の鋼床版等の一部に亀裂が発生するような損傷事例が現れるようになってきた。亀裂による損傷は、金属疲労が原因であると考えられており、今後大型車交通の多い路線や、供用後経過年数が多い路線を中心として、亀裂の発生は避けられないと考えられる。

また、償還満了時における45年後には、供用後50年以上の構造物が多くを占めることになり、現時点から予防保全を含めた対策が必要である。

一方、2003年12月の道路関係四公団の民営化に関する政府・与党申し合わせにより、「管理費については、2005年度までに3割のコスト削減を図る」こととされた[4]のを踏まえ、構造物の老朽化が進展しているにもかかわらず、大幅な維持修繕費の削減に踏み切らざるを得ない状況となっている。

削減メニューとしては、清掃頻度の見直し、電気、機械設備に関する点検手法並びに頻度の見直し、簡易鋼製伸縮継手等の新技術、新材料の採用による長寿命化、工区統合等契約方法の見直し等があげられる。維持修繕費を削減したことにより、路面の不具合事象（飛び石による事故件数、落下物による事故件数）、交通事故リスク、補修数量の増加等が懸念されているところである。

しかしながら、現在のところでは、維持修繕費3割削減による影響はそれほど深刻ではないが、問題を

先送りしている懸念があるため、今後とも注意深く見守っていく必要があると考えている。

このような厳しい条件下で多種多様の構造物かつ交通量の多いネットワークを維持管理していくために各管理者では管理手法の合理化や新技術の導入等に取り組んでいるところである。

1.3 顧客満足と維持管理効率化に向けた取り組みの必要性

1.3.1 現状の課題と新しい維持管理体系の構築

高速道路の維持修繕については、これまで過去の実績等を踏まえて経験的に実施していた。しかし、今後は、図1-4に示すとおり構造物の老朽化の進行、維持修繕に関する費用や人員の減少、道路サービスに対するニーズの高まり等を踏まえて、より合理的な維持修繕が求められている。

有料道路事業者である道路関係四公団は2005年10月より民営化され、今後は5年毎に機構との協定締結が求められることになった。民営化時に債務と資産は機構に移管され、道路会社は機構から高速道

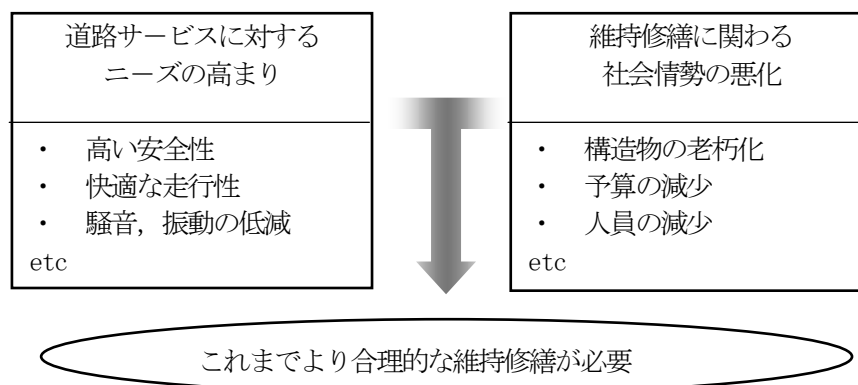


図1-4 高速道路会社における現状

路資産を借受けて維持管理を行う。このとき、通行料金収入を原資にリース料を機構に支払い、機構はリース料収入で債務を返済する。そのため、道路会社は民営化から45年後の償還期限までの債務返済を念頭におきながら、適切な管理水準が維持できるよう計画的な維持管理を実施しなくてはならない。

機構は道路会社からのリース料で債務を返済し、民営化から45年後までに債務を完全に返済しなければならない。リース料や債務の返済計画については、道路会社と機構との間で締結される協定で決定される。協定は概ね5年毎に見直される。機構との協定では以下に示す内容が規定される[4]。

- 1) 工事の内容および工事に要する費用に係る債務引受限度額
- 2) 修繕に係る工事の内容
- 3) 修繕に係る工事に要する費用に係る債務引受限度額

- 4) 災害復旧に要する費用に係る債務引受限度額
- 5) 無利子貸付計画
- 6) 道路資産の貸付料の額
- 7) 計画料金収入の額
- 8) 料金の額および徴収期間

また、機構との協定の中では、各種の債務引受限度額や貸付料や料金収入の額等が規定されており、債務の返済計画については、道路会社と機構のそれぞれに収支予算の明細で示される。

道路会社は維持管理にかかる費用を、原則として通行料金収入から調達しなければならないが、維持修繕工事において、資産形成とみなされる工事については、通行料金以外の手段で調達することとなっている。借入れによって調達した場合には、新たに負債が発生する。新たな負債は機構に移管され、貸付料で返済することとなる。以上のことから、従来より一層、外部に対して十分な説明責任が求められる。

有料道路事業は利用者から通行料金を徴収し、その対価として高速道路サービスを提供していることから、道路利用者や機構等の外部に対して費用に関する根拠資料を含む定量的な説明を行う必要がある。

また、外部に対する説明責任を向上させるためには、策定した維持修繕計画が検証可能である必要がある。維持修繕計画を検証可能にするためには、維持修繕計画の策定ルールをあらかじめ決めておく必要があり、一方で、検証される維持修繕計画が適切と判断されるためには、策定ルールが客観的な根拠に基づいている必要がある。

1.3.2 新しい維持管理体系の構築目的

有料道路事業は利用者の通行料を主な収入としており、その収入の一部によって維持修繕を行っている。収入を増加させるためにはより高い道路交通サービスを提供する必要があり、支出を低下させるためには維持修繕を抑制する必要がある。一般的に、道路のサービス水準と維持修繕費は相関関係にあり、維持修繕費を多く費やすとサービス水準が向上し、維持修繕を抑制するとサービス水準は低下する。

しかし、維持修繕費を増加させると限りなくサービス水準が向上する訳ではなく、路面補修の回数を過度に増加させるとサービス水準があまり上がらなくなるばかりか、交通規制による損失が発生し、逆にサービス水準が低下する。よって、維持修繕には最適な水準が存在すると考えられる。

以上より、「最大のサービスを最小コストで実現すること」、つまり「費用対効果の最大化」を新しい維持修繕体系を構築することの最終目的とする。

最大のサービスを最小のコストで実現するために、必要な事項と手順を以下に示す。

- 1) 構造物の状態（アウトプット）を正確に把握すること

- 2) 構造物の状態に対するサービス水準（アウトカム）を正確に把握すること
- 3) 構造物の状態を正確に予測すること
- 4) 予測結果と現状（アウトプット、アウトカム）から適切な維持修繕計画を立案すること
- 5) 維持修繕計画にしたがって施策を適切に実施すること
- 6) 施策の実施効果（アウトプット、アウトカム）を正確に把握すること

構造物の状態とサービス水準が正確に把握でき、それらの将来の推移を正確に予測できれば、正しい情報によって意志決定を行うことができる。正しい情報に基づいて適切な意志決定ができれば、立案した維持修繕計画は最適となる。計画に従って施策を適切に実施できれば実施した施策は最適となる。さらに、施策の実施後に構造物の状態とサービス水準が正確に把握できれば、施策の効果や妥当性を検証することができる。

現実的には、上記の1)～6)はいずれも完全に実施することはできないが、可能な限り上記の理想を目指すことによって、より効率的な維持修繕を行うことができる。よって、新しい維持修繕体系は、上記1)～6)の手順を参考に構築する。

1.3.3 従来と現在および将来の維持管理体系

従来と現在および将来の維持修繕体系を図1-5に示す。従来の維持修繕では、点検結果に基づいて適切と思われる対策方法や対策時期を経験的判断していた（経験的マネジメント）。このような経験的な維持修繕は客観的な判断に基づいていないため、人によって判断に差が生じたり、判断根拠を明示できず説明責任を果たせないという問題があった。判断に客観性を持たせて説明責任を果たすためには、構造物の状態を適切な方法で予測し、コストが最小となる対策時期やいつどの程度の予算が必要となるのかを事前に把握しておく必要がある。そのため、LCCが最小となる最適な対策時期と予算制約を考慮した場合の構造物の状態と費用の推移を自動的に予測計算するシステムとしてブリッジマネジメントシステム（以下、BMS という）を構築し、将来的な道路の機能水準、必要予算額、補修の優先順位等を算出し、維持管理計画の策定するうえでの支援支援システムとして開発する流れがある。

これによって、効率的な維持修繕費の配分が可能となり、より適切な維持修繕計画を立案するとともに、立案根拠の明確にすることによって説明責任を向上させることができるようになった（計画的アセットマネジメント）。BMSによって計画的な維持修繕計画の立案が可能となるが、BMSは構造物の状態（アウトプット）に着目しており、顧客である利用者の利便性を反映していない。

有料道路事業者の主な事業は都市部におけるインフラ事業であるため、より良い公共サービスを利用者に提供する必要がある。

また、民間経営の観点からも有料道路事業者の主な収入は通行料金であることから利用者により良い

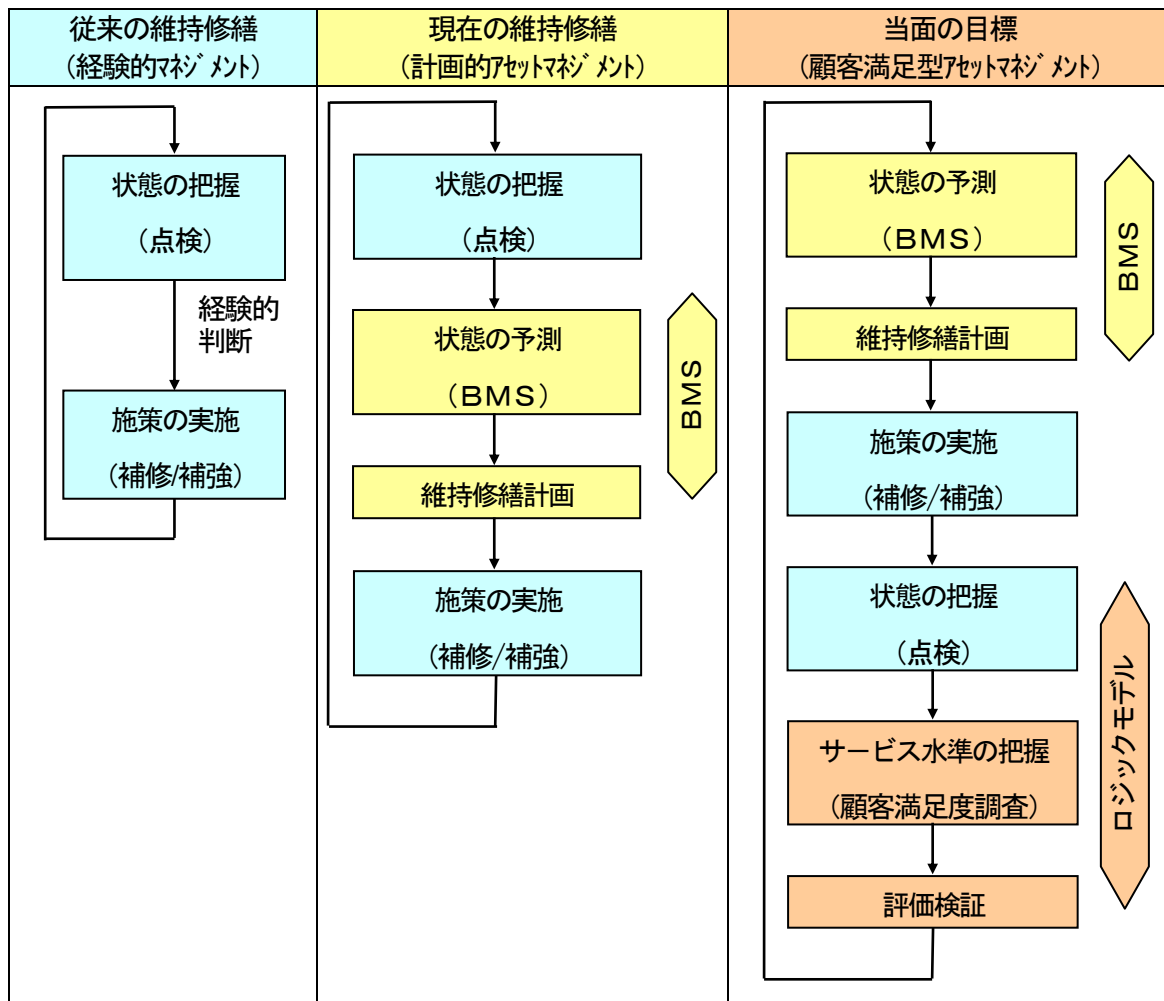


図1-5 従来と現在および将来の維持修繕体系

サービスを提供することによって収入を確保しつつ、支出である維持修繕費を抑制し、費用対効果の最大化を図る必要がある。現在、国、地方公共団体等においてアセットマネジメントシステムの開発が進められているところであるが、そのうち高速道路の維持管理業務を効率化するためのシステム開発については、例えば、路上障害物の発生過程をポワソン過程としてモデル化し、巡回費用の削減を達成するような望ましい道路巡回政策を検討する障害物発生リスク管理モデルを提案し、その有用性を実証的に検証している研究[5]や、高速道路のトンネル照明の劣化過程をモデル化し、LCC と不点灯によるリスクを考慮したトンネル照明システムの最適化について提案、検証している研究[6]がある。

しかし、これらの研究は、個別の維持管理業務の効率化に焦点を置いており、維持管理業務全体の効率化を目的としたものではない。これまでの維持修繕は構造物の状態のみに着目し、利用者の利便性には着目していなかったことから、今後は、利用者の利便性を把握するために顧客満足度調査等のアウトカム指標を用いた評価、検証方法の検討を行うとともに[7]–[12]、維持修繕費として対策費用を投資したことによる構造物の状態の回復（アウトプット）だけではなく、利用者の利便性向上（アウトカム）の把握を目指す必要がある（顧客満足型アセットマネジメント）。顧客満足度調査により利用者の利便性

を把握することによって、投資効果を直接的に把握することが可能になる。

1.3.4 顧客満足型アセットマネジメントのマネジメントサイクル

「顧客満足型アセットマネジメント」の手順と全体像を図1-6、図1-7に示す。まず、計画段階（PLAN）では、BMS[13]-[15]による予測に基づいて投資投資判断を行い、維持修繕計画を立案する。次に、資源、活動段階（DO）では、維持修繕計画に基づいて予算を決定し、施策（補修、補強）を実施する。続いて、結果段階（CHECK 又は SEE）では、点検と顧客満足度調査によって、それぞれ構造物の状態と利用者のサービス水準を把握と、施策の実施効果を確認する。さらに、評価、検証段階（ACTION 又は SEE）において、ロジックモデルに基づいて施策の評価、検証を行う。以上の結果を計画段階（PLAN）に反映し、スパイラルアップを図る。なお、一連のマネジメントサイクル（PLAN-DO-CHECK-ACTION 又は PLAN-DO-SEE）で使用、収集されるデータはデータベースシステムにおいて一元的に管理される。このように、BMS は主に計画段階（PLAN）、ロジックモデルは主に結果から評価、検証段階（CHECK-ACTION）の支援ツール、またデータベースシステムはこれらのデータ管理ツールとして位置づけられる[16]。

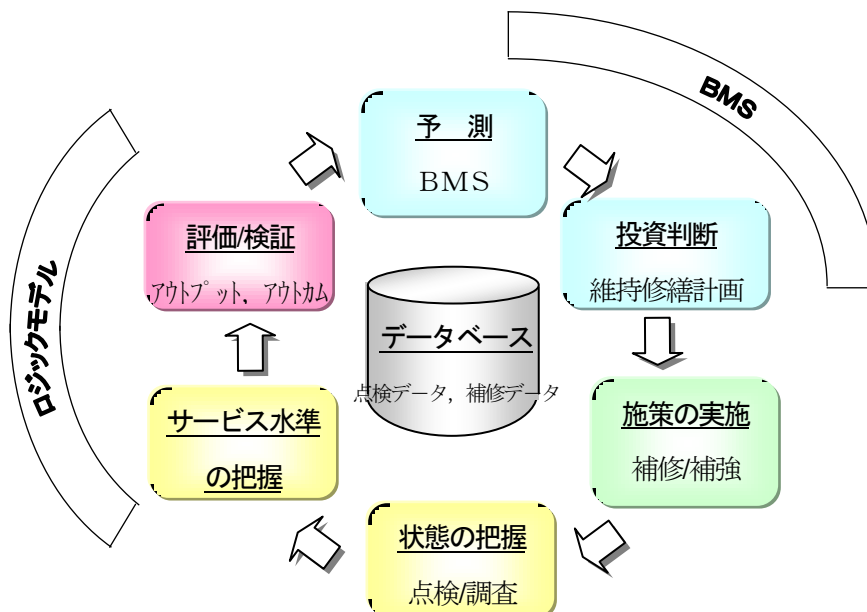


図1-6 顧客満足型アセットマネジメントのマネジメントサイクル（坂井(2008)¹⁰⁾）

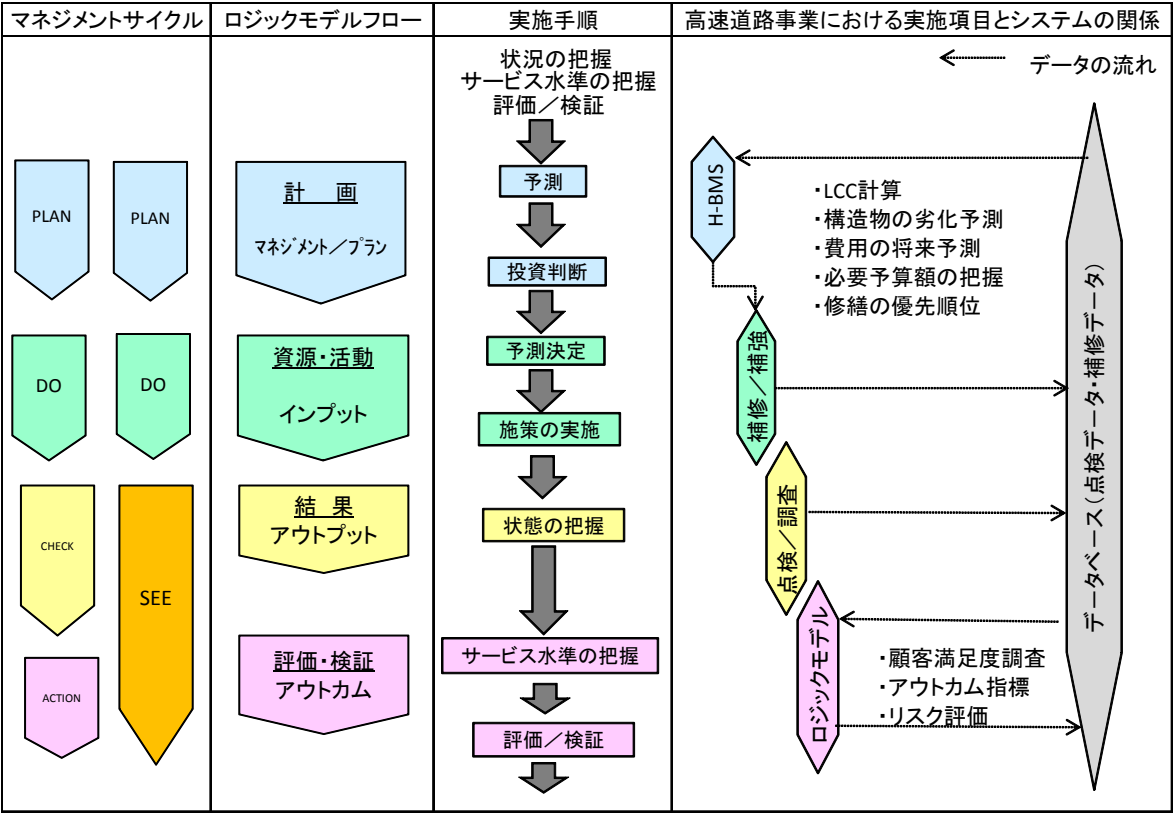


図1-7 顧客満足型アセットマネジメントの手順と全体像

1.4 本論文の構成

本論文の構成としては、以下に示すとおりである。

第2章において、国、地方公共団体等、行政における目標管理の事例として“New Public Management”理論に基づき、都市高速道路における経営目標管理と経営マネジメントシステムの方法論について提案を行う。都市高速道路におけるアセットマネジメントシステムとして、阪神高速道路株式会社を例として、維持管理ロジックモデルを構築するとともに、ロジックモデルによる政策評価手法について、併せて提案するものである。

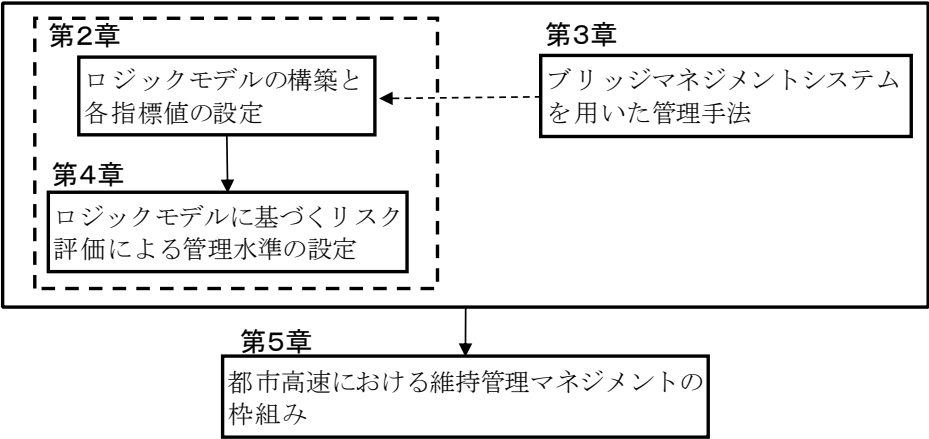


図1-8 本論文の構成

都市高速道路の維持管理については、従来の橋梁やトンネル等の構造物の維持管理に加え、道路利用者の走行時路面の安全性を確保するための路面清掃や路上点検、交通情報を持続的に提供するための情報システムの保守点検、道路利用者にパーキング施設等を快適に使用していただくための施設清掃業務等、多様な業務活動で構成される。道路管理者には、道路を常時良好な状態に保つ義務がある一方で、同時に維持管理業務の効率化を達成することが求められている。

本研究では、道路利用者に対して直接的な影響がある路上点検等の日常維持管理業務をマネジメントするために開発した維持管理ロジックモデルの構築手法並びにインプット、アウトプット、アウトカムについて定量的に指標として定義づけるとともに、PDCA サイクルに従い適切に評価、検証する手法を提案している。

第3章では、企業における内部統制とリスクマネジメントの必要性について述べるとともに、**第2章**において開発した維持管理ロジックモデルを用いて、リスクマネジメントの立場から、維持管理業務の効率化、適正化を達成するための方法論について考察する。リスクの定義は多様であるが、リスクを「被害の起こる確率」と「起こった場合の被害の大きさ」の積として定義する。維持管理におけるリスクとは、点検や補修、清掃等の維持管理を怠った場合に生ずる事故や大規模補修、苦情、管理瑕疵等の発生として考えることができる。

本研究では、維持管理業務のリスクマネジメントの目標、手段体系をロジックモデルとして体系的に整理し、アウトカム指標、アウトプット指標の設定を通じて、維持管理上のリスク水準の適正化について検討する。すなわち、リスク水準が高い管理項目に関しては、メンテナンスのレベルを上げてリスク軽減を図るとともに、リスク水準が必要以上に低いものについては、管理水準を引き下げることにより、コストを縮減する。それにより、管理施設全体のリスクをバランスよく抑制しつつコスト縮減を達成することができる。

道路施設の不具合（路面の穴ぼこ、落下物、土砂等）の発生状況は、路線によって異なる。点検頻度を多くすれば、不具合を放置する時間が小さくなるので、道路利用者がその不具合に遭遇する確率を減らすことができる。しかし、路線毎に交通量が異なるため、道路利用者が不具合に遭遇する確率をバランスよく抑制するためには、交通量の多い路線では点検頻度を多くするとともに、交通量が少ない路線では点検頻度を低減することも考慮する必要がある。

そこで、不具合に遭遇する確率と交通量の大きさの積をリスクと定義するとともに、路線毎に異なるリスクを、バランスよく目標とする管理水準に近づけることができれば、路線網全体におけるリスク水準の適正化を図ることが可能となる。さらに、維持管理業務におけるリスク管理目標（アウトカム）、リスク管理水準（アウトプット）、および維持管理業務の内容（インプット）の関係を、ロジックモデルを用いて分析することにより、維持補修業務全体を対象としたリスク管理水準の適正化、サービス水準の内容を総合的に検討することが可能となる。

なお、これらの検討は、将来、維持補修業務の性能規定型発注を見据えたものであり、リスク管理の適正化という視点から明確な根拠に基づいて性能規定を設定するための方法論の開発という目的も有していることを指摘しておきたい。

第4章では都市高速道路における BMS として、阪神高速のブリッジマネジメントシステムである H-BMS に着目し、同システムに搭載する舗装並びに本体構造物の劣化予測手法について検討を行うとともに、H-BMS を用いた補修優先順位の提案を行う。

第5章では**第2章**から**第4章**までの検討を踏まえ、内部統制に着目した都市高速道路の業務プロセスとロジックモデルの関係を整理し、ロジックモデル並びに H-BMS を用いたリスクマネジメント財務分析を行い、戦略的な維持管理のための方法論を提案するものである。

最後に、**第5章**において、本研究の知見を整理するとともに、本研究で残された課題をとりまとめる。

参考文献

- [1]国土交通省道路局：「道路構造物の今後の管理・更新のあり方」に関する提言，2003-2004
- [2]土木学会：アセットマネジメント導入への挑戦，2005.11
- [3]国土交通省道路局：「道路橋の予防保全に向けた提言」，2008.5
- [4]独立行政法人日本高速道路保有機構：高速道路機構ファクトブック，2008
- [5]貝戸清之，保田敬一，小林潔司，大和田慶：平均費用法に基づいた橋梁部材の最適補修戦略，土木学会論文集，No.801/I-73，pp.83-96，2005.
- [6]小林潔司：分権的ライフサイクル費用評価と集計的効率性，土木学会論文集，No.793/IV-68，pp.59-71，2005.
- [7]坂井康人，西林素彦，荒川貴之，小島大祐，小林潔司：高速道路の効果的な維持管理を目的としたロジックモデル（HELM）の検討，第62回土木学会年次学術講演会，2007.
- [8]坂井康人，上塚晴彦，小林潔司：ロジックモデル（HELM）に基づく高速道路維持管理業務のリスクマネジメント，第27回日本道路会議，2007.
- [9]坂井康人，上塚晴彦，小林潔司：ロジックモデル（HELM）に基づく高速道路維持管理業務のリスク適正化，建設マネジメント研究論文集，土木学会，Vol.14，pp.125-134，2007.
- [10]Yasuhito SAKAI, Kiyoshi KOBAYASHI, Haruhiko UETSUKA：Risk Evaluation and Management for Road Maintenance on Urban Expressway Based on HELM (Hanshin Expressway Logic Model)，The Fourth International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management，pp.574-581，2008.

- [11]Yasuhito SAKAI, Kiyoshi KOBAYASHI, Haruhiko UETSUKA : New Approach for Efficient Road Maintenance on Urban Expressway Based on HELM (Hanshin Expressway Logic Model), Society for Social Management Systems 2008, pp.1/11-pp.11/11, 2008.
- [12]中林正司, 西岡敬治, 小林潔司: 阪神高速道路の維持管理の現状と課題, 土木学会論文集 vol.6, No.4, pp.494-505, 2007.
- [13]片山大介, 西林素彦, 閑上直浩: 阪神高速道路の橋梁マネジメントシステムについて, 第26回日本道路会議, 2005.
- [14]Motohiko Nishibayashi, Naohiro Kanjo, Daisuke Katayama : Toward more Practical BMS: Its Application on Actual Budget and Maintenance Planning of a Large Urban Expressway Network in Japan, The Third International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, 2006.
- [15]Yasuhito Sakai : Practical Asset Management System of Hanshin Expressway-Logic Model and BMS, 2nd International Workshop on Lifetime Engineering of Civil Infrastructure, pp.239-255, 2007.
- [16]坂井康人, 荒川貴之, 井上裕司, 小林潔司: 阪神高速道路橋梁マネジメントシステムの開発, 土木情報利用技術論文集, 土木学会, Vol.17, pp.63-70, 2008.

第2章

ロジックモデルの構築と各指標値の設定

2.1 緒言

本章では、国、地方公共団体等、行政機関における“New Public Management”理論（以下、NPM という）に基づく経営目標管理と行政経営システムの概念について考察を行うとともに、都市高速道路の維持管理に着目したアセットマネジメントサイクルの一つとしてロジックモデルを用いた管理手法について提案するものである。

ロジックモデルについては、維持管理業務のうち、LCC 等による工学的評価が困難な「清掃」、「保守点検」業務を対象とするとともに、土木施設の本体構造物の補修をも含む総合的な内容となっており、各々の活動の実施が期待する成果へ至る過程を把握し、定量的な指標、管理水準を設定することで、個々の業務の業績達成度を評価し、最適な規模（頻度、体制）を提示するツールとして適用することを期待している。

アセットマネジメントシステム構築にあたっては、最初に目標とするサービス水準や管理水準を設定したうえで、現状のインフラの状態を点検、評価することによって把握し、目標達成のための事業を、計画、選定、実施し、その結果を次のサイクルで把握しながら目標達成を実現するマネジメントが必要である。

これらの中で、重要な意志決定は、点検、評価によって得られた結果に基づき、個々の施設の維持管理計画を策定することと、限られた予算を効率的に配分するために、複数の施設群に対する計画に優先順位をつけ、実際の投資（事業実施）の意志決定を行うことである。前者については、将来発生する維持管理費用（LCC）を最小化することを目標に、後者については、施設群全体のリスクを提言し、提供されるサービスを最大化することを目標に行うことになる。

2.2 行政経営マネジメントシステムとロジックモデル

2.2.1 行政経営マネジメントの重要性

行政マネジメント、いわゆる欧米における NPM[1]-[2] とは、公的部門に民間企業の経営管理手法を幅広く導入することで効率化や質的向上を図ろうとするもので、1980 年代の半ば以降、英国、ニュージーランド等のアングロサクソン系諸国を中心に行政実務の現場を通じて形成された行政経営手法である。

その背景として、経済の停滞、少子高齢化に伴う財政悪化、公的負債増加や公共部門のサービス効率低下等の問題が顕在化してきたことが挙げられる。その核心は、民間企業における経営理念や手法、さらには成功事例等を可能な限り行政現場に導入することを通じて行政部門の効率化、活性化を図ることにある。

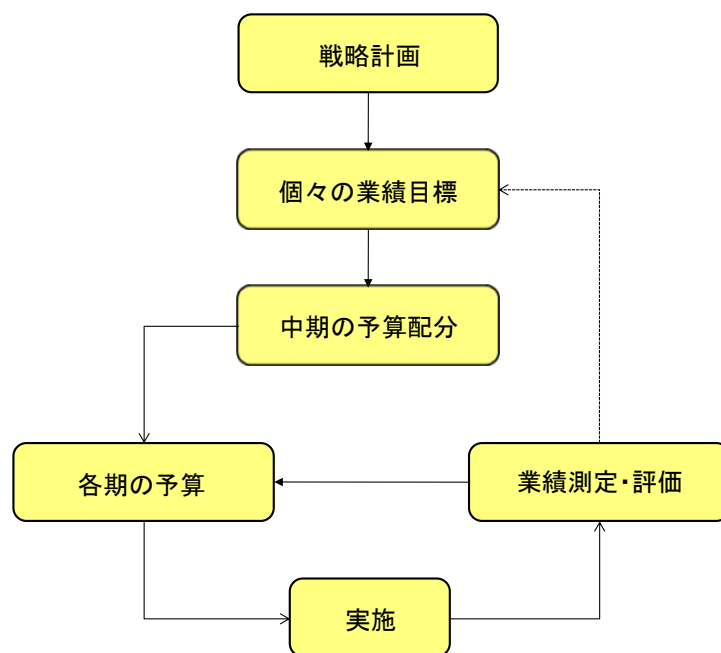
NPM の根本的な目的は、公的サービスの価値の向上にあるが、具体的には経営資源の使用に関する裁量を拡大する代償として、業績、成果による統制を行う。

そのための制度的な仕組みとして、公的企業の民営化や民間委託、エージェンシー、内部市場等の契約型システムの導入を図る等、市場メカニズムを可能な限り活用するとともに、住民をサービスの顧客と見ることにより、統制の基準を顧客主義へ転換する。さらに、組織の階層構造を簡素化することにより、統制しやすい組織に変更することが重要である[1]。

NPM の目標を達成する手法の第1は「権限委譲」と「業績測定」である。従来の行政組織では規則による統制が行われている。しかし、これでは業績に対する責任の所在が不明確であり、情報は現場にあるため、現場以外の者には真に適切な評価ができない。さらに、執行部門により活動や情報が隠されるリスクへの対処も困難である。

そこで、行政組織の中で企画、立案部門と執行部門を分離し、執行部門に権限を委譲し、その代わりに現場から加工しない客観的なデータを提出してもらい業績に対する責任を持たせる、というものである。その際、マネジメントサイクルを実現することが極めて重要とされる。従来の行政システムでは、「PLAN（計画）」と「DO（実施）」のみの業務の流れであり、評価の結果が次の「PLAN」に直接には反映されていない。そのため、事後評価等の結果を次の「PLAN」にフィードバックするマネジメントサイクルを構築する必要がある。

NPM におけるマネジメントシステムは、1980 年代半ば以降大きく変革した企業経営の考え方を背景に、業績、計画、予算の連鎖について図2-1のように示される[3]。基本的なイメージは「戦略計画」を行政運営の核として採用し、そして行政機関や自治体のビジョンを具体的な目標として具体化し、さらに各業務セクション毎の業績目標として明確化する。これをもとにした行政評価をフィードバックす

図2-1 業績、計画、予算の連鎖（大住(2003)⁴⁾）

ることを通じたマネジメントサイクルを形成し「戦略計画」の調整を行う。その際、NPMでは「意志決定プロセスへの有効性」という観点から「経営学の考え方」を大胆に導入している。

住民を行政サービスの顧客としてとらえ、行政の責務を「顧客」のニーズを反映した行政運営を行うことにおく。そのための道具として、市場調査、顧客満足度調査等の経営学の手法を活用し、「住民のニーズ」を意志決定のプロセスに直接反映させることを考える。政策の効果は、業績、成果をわかりやすい指標を活用することで、その効果を数値により議会、住民から監視しうるシステムを構築することにより事後評価する仕組みを目指している。

欧米等の州政府や自治体におけるNPMの先進事例では、議会、行政、住民の関係は図2-2のようになっている[3]。

- 1) 首長は戦略計画を策定し、個々の重点的な政策目的に見合った計画可能な目標をベンチマークとして明示する。その際、戦略計画の基本的なビジョンは選挙の公約となるし、その具体的なプロセスで住民ニーズについての調査を背景に体系化を図っている。
- 2) 戦略計画の具体案作りは基本的に行政の役割である。住民のニーズを背景に首長および行政機構は戦略計画をまとめ、これを達成するための手段である具体的な施策と事業をリンクさせる。
- 3) このような戦略計画に基づく一連のフレームを議会に提出し、議会は基本政策のビジョン、優先順位についての判断、基本政策の目標実現のための手段（施策、事業）の有効性についての評価を行う。
- 4) 政策の実行状況は、基本政策の具体的目標を数値化する（ベンチマーク）ことで、ベンチマークとの比較で住民、議会から恒常的に監視され、業績、成果の上がらない政策分野については、施策、事業

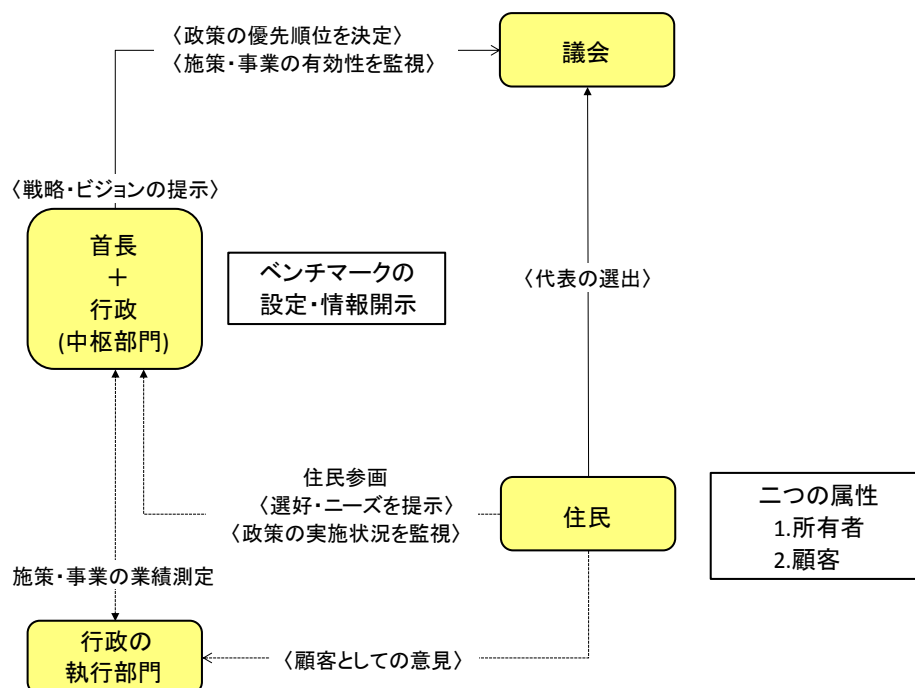


図2-2 NPMのもとでの議会、行政、住民の関鎖（大住(2003)⁴⁾）

の妥当性、有効性を評価し、次の予算編成等の意志決定プロセスにフィードバックさせることで、政策目標の変更、政策手段（施策、事業）の改廃等が進展する。ここで、住民は「所有者」と「顧客」の立場のほか、「ステークホルダー（行政の参加者；例えばNPO）」としての立場も重要とされている[4]。

一方、国、地方公共団体等、わが国においてもNPMの流れを受け、2003年に「行政機関が行う施策の評価に関する法律」が施行され、同法に基づいて政策評価を行うこととなった。

この政策評価を積極的に取り入れ、業績の達成度として、いくら投入したか（インプット）、何ができたか（アウトプット）ではなく、国民生活の何がどのように改善されるか（アウトカム）に着目しつつ、政策の企画立案-実施-評価-政策の改善というマネジメントサイクルの確率を目指していこうというものである。

社会資本については、その整備を目的とする公共事業について事業の進め方等に対する問題提起がなされたため、それ以前から費用対効果分析を中心とする事業評価が導入されていたが、行政評価法によりそれが法律に基づくものとなった。

政府機関の政策評価においては、行政の効率的な推進と国民への説明責任が主な目的であり、その観点から顧客満足度調査に着目した行政評定が導入されるようになった。また、これらの動きにあわせて、財政制約や公共部門の人材不足をカバーする観点から、アウトソーシングやPFI等の民間セクターが活用手法が導入されてきている。

さらに、2001年6月の経済財政諮問会議答申である「今後の経済財政運営および経済社会の構造改革

に関する基本方針（骨太方針）」が閣議決定され、政策プロセスの改革における新しい行政手法として、NPMの適用が盛り込まれた。こうして、現在、関係機関による様々な取り組みが進められている。

例えば、国、地方公共団体等の行政機関における経営戦略目標を達成するためには、実際に執行される住民サービス、社会資本等への投資や維持管理等が最終的に経営戦略目標のどのような論理関係にあることが様々な点で重要である。論理関係が不明瞭である場合、実際の行政において執行される予算による説明責任を果たすことができなくなり、市民の納得が得られず様々な摩擦を生むことになる。経営戦略目標と実際に執行される諸施策、事業および予算等が論理的に結びついた関係を表したものがいわゆる「ロジックモデル」の「形態」であるが、ロジックモデルは行政経営プロセスや政策、施策評価システム等において様々な役割を果たす。行政における経営戦略モデルは次のように示される。

第1のプロセスは、現場における業績測定（Performance Measurement）によりボトムアップする仕組みである。NPM理論の第1要素は「業績、成果主義（志向）」であった。これは、個々の施策や事業レベルの発想を「手続き主義」から「成果志向」に転換するための制度的な工夫である。

第2のプロセスは、中枢レベルからの「戦略計画」アプローチである。自治体のビジョンの策定、政策目標間のプライオリティづけを確立させこれを現場レベルの業績目標に落とし込む。これは、目標達成のための施策や事業の連携を図ることであり、これは戦略計画策定プロセスそのものとなる。自治体のビジョンや政策目標のプライオリティづけを行うには、住民のニーズの把握が前提となる。このような2つの改革アプローチは、戦略計画と業績測定（Performance Measurement）の体系の中で明確に整理される。両者の関係は図2-3のように示される。地域の数年先のビジョン（将来像）を明確にした「戦略計画」を地域住民の参加、協働を前提に策定し、ビジョン、目標の共有を図る。

ビジョンや目標の達成にあたっては、行政、住民、NPO、産業界等とのアウトカムの分担（シェアード・アウトカム）が図られる。戦略目標（Strategic Goals）の達成をさらに行政現場にリンケージさせるために具体的な業績目標（Objective）にブレイクダウンし、これの達成をもとにした予算がリンクされる。行政現場の業績目標は組織全体のビジョンや戦略目標の達成へロジックモデルが描かれるため、ビジョンと目標が組織内部でも共有される。

このような「戦略行政」への転換は、公共部門の経営改革には不可欠であるとともに、行政評価手法の導入に併せて意思決定プロセスを根本的に変革することであり、このようなNPMの理念をマネジメント改革に生かすべきである[4]。

また、NPM論の目指すべきところとして、組織の改組に対応し、「ミクロマネジメント」と「マクロマネジメント」という2つのアプローチも考える必要がある。図2-4に示すように、ミクロマネジメントとは、現場に近い部局が実施するサービス水準の設定や、事業調達のオプションに関わるマネジメント等に代表されるものであり、マクロマネジメントとは、政策指針の決定や投資額のトレードオフ分析等がその主なものである。NPM理論によれば、すべての施策、事業には、必ず、その活動によって、

どのような成果を産み出すのか（もしくは、産み出そうとしているのか）という論理、道筋の仮説が存在することがいえる。

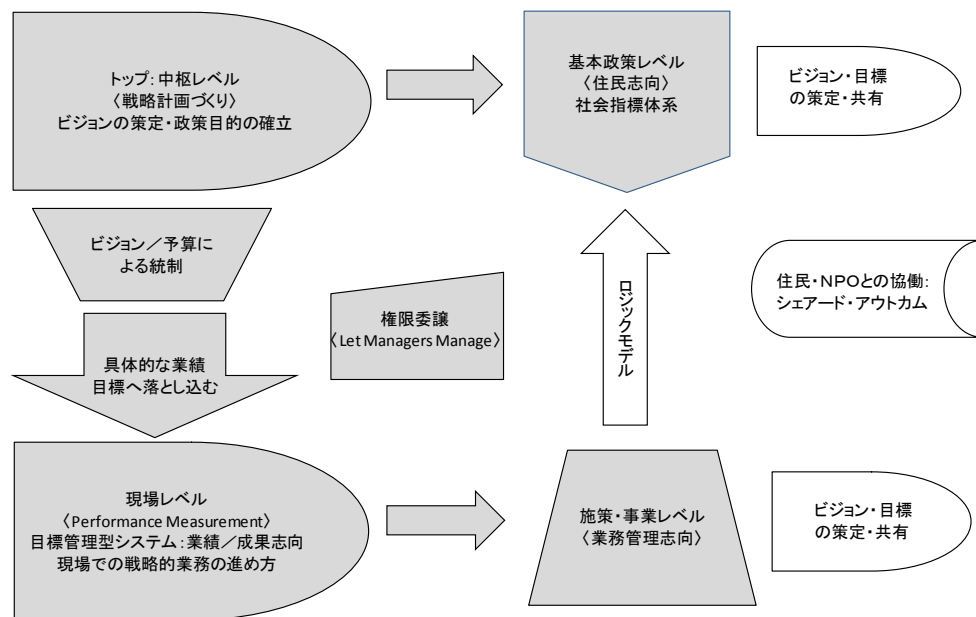


図2-3 行政経営における「戦略計画」と「業績評価」のイメージ (大住(2003)⁴⁾)

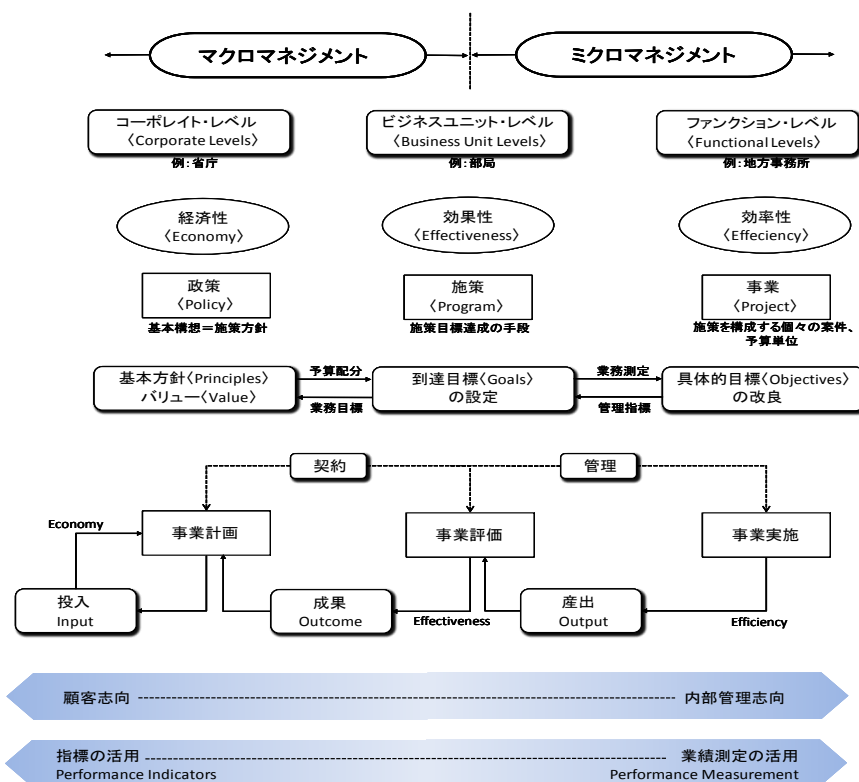


図2-4 NPM論の目指すべきイメージ (アセットマネジメント導入への挑戦(2005)¹⁾)

2.2.2 都市高速における経営マネジメントとロジックモデルの概要

NPM 理論を都市高速道路における維持管理業務に導入することを考える。都市高速道路における経営マネジメントシステムには、予算執行のマネジメントと政策評価のマネジメントの2つのマネジメントサイクルが存在することがいえる。この2つを内部統制の観点からもリンクさせることが非常に重要である。第1に予算のマネジメントサイクルを図2-5示す。このシステムは経営レベル、戦略レベル、維持修繕レベルの3階層の構造と考えられ、階層的なマネジメントサイクルに基づきPLAN-DO-CHECK-ACTIONを実践していくことである。マネジメントサイクルのうち、一番内側の維持修繕レベルのPLAN-DO-CHECK-ACTIONは、例えば、単年度の補修計画、補修工事の実施であり、1年のサイクルで非常に早く回っている。予算が決まり、その予算のもとで、どこを補修すべきか決定し、実際に補修工事を実行するシステムである。その外側は、戦略レベルであり、現場での点検データが上がってくるので、新しいデータを得ることができ、そのデータをもとに中期計画としてどのような補修工法を採用していけばいいか、あるいは今後5年間程度の予算確保に関する検討を行い、計画を策定していく。さらにその外側には、経営レベルとして、長期的に予防保全等の補修戦略を策定し、構造物の機能水準を維持するとともに、適正なサービスレベルを決定することにより、ステークホルダーへの説明責任を果たしていく、という仕組みになっている。

アセットマネジメントは、狭義な視点でみると現場における効率的な維持、修繕、補修計画の策定、実践から、広義な視点でみると財政当局からいかに修繕予算を確保していくか、さらにもっと広げれば、様々なステークホルダーに対して維持管理の重要性をどのように認識してもらうか、そのようなことも含めた非常に幅広いマネジメントである。言い換えれば、アセットマネジメントは単に現場だけのサイクルではなく、インフラを主にしている組織全体のマネジメントと連動しているということである。

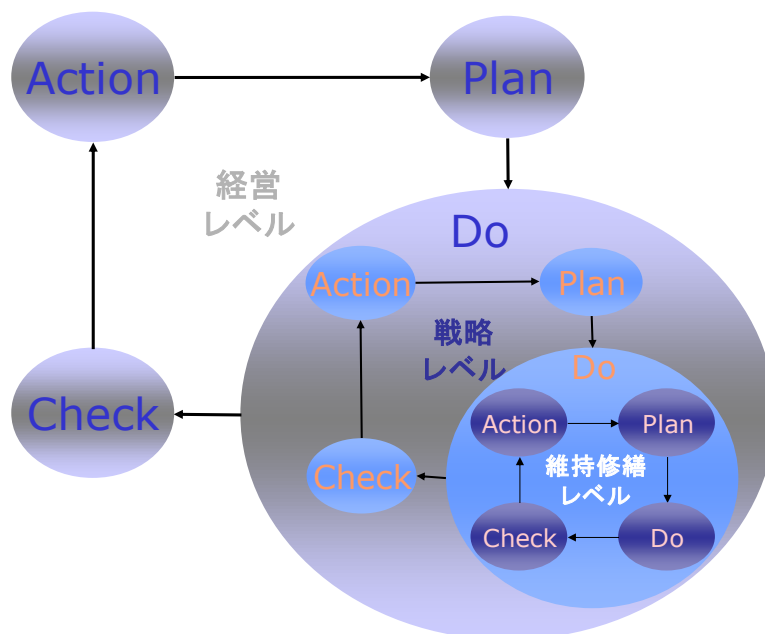


図2-5 予算執行のマネジメントサイクル

第2に政策評価のマネジメントサイクルを図2-6に示す。

予算執行のマネジメントサイクルでいうと、「長期計画」は外側の「経営レベル」のサイクルになる。

「中期計画」が「戦略レベル」，「短期計画」が「維持修繕レベル」に該当する。「政策ロジックモデル」とあるが，ロジックモデルとは，ツールボックスのようなもので，ロジックモデルに基づいてサイクルが稼働している。言い換えれば，ロジックモデルとは，現場のマネジメントを稼働させるためのツールもしくはマニュアルであり，技術そのものを集大成であるといえよう。

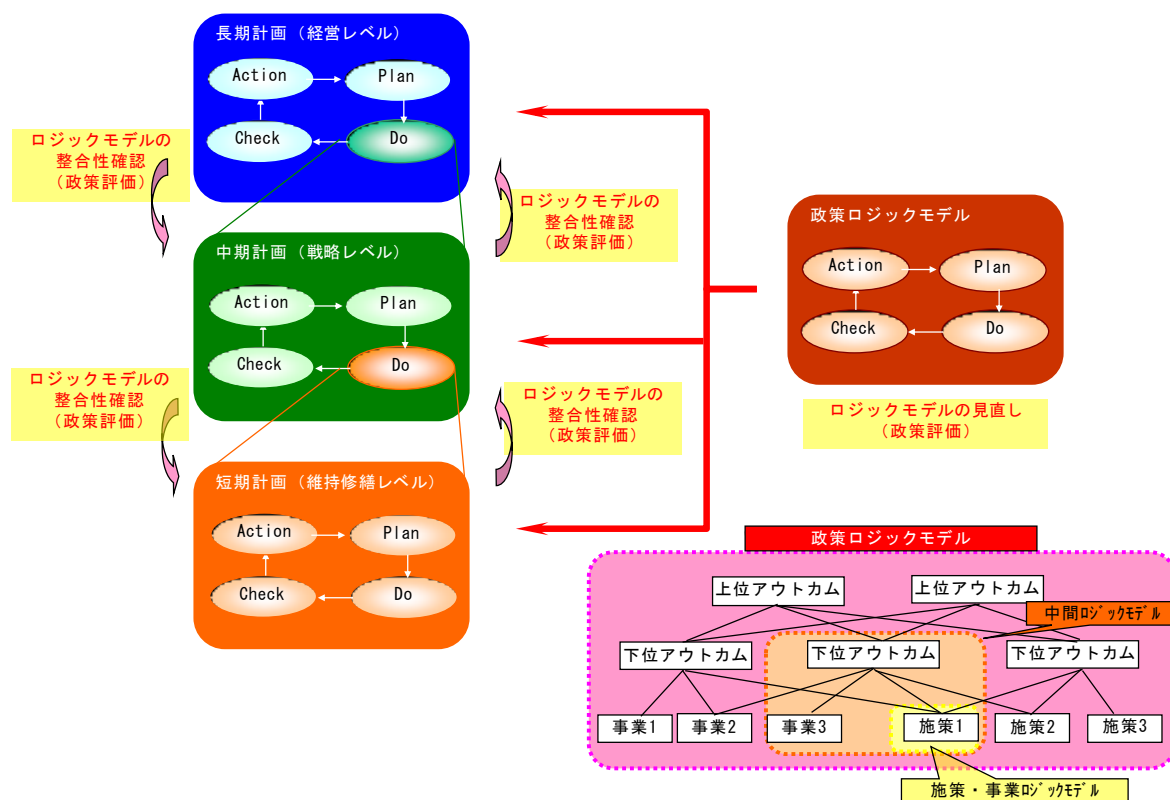


図2-6 政策評価のマネジメントサイクル

政策評価のマネジメントというのは，ロジックモデル自体を変えていかなければならないということである。例えば，新しい工法等を通じてロジックモデル自体を見直していくことが求められる。ロジックモデルを毎年変えていくことをPLAN-DO-CHECK-ACTIONという。

従って，マネジメントには，予算執行のためのマネジメントとそのマネジメントを動かすマニュアルのマネジメントの2種類あるということである。

新しい経営マネジメントの考え方の最大の論点は，ロジックモデルを変えるということである。政策評価というのは，ロジックモデルの矢印や体系がよいものかどうかを評価することであり，評価にあたりロジックモデルは大きな役割を果たしている。ここで，ロジックモデルとは，1988年にW.K.ケロッグ財団が発行した「W.K.ケロッグ財団評価ハンドブック」によれば，「基本的にロジックモデルとは，あなたのプログラムで運営する資源，計画した活動，達成したい変化や結果の関係についてのあなたの

理解を共有するために、系統立てて見える形式に表現したものである。最も基礎的なロジックモデルは、あなたのプログラムがどのように機能するかを図化したものである。活動がどのような流れで変化をもたらすか、その活動がプログラムが達成することを期待されている結果にどのようにつながっているかを図および言葉により表現する」と定義されている[5]–[6]。しかし、「W.K.ケロッグ財団評価ハンドブック」[5]では行政経営において重要なロジックモデルの形態や機能に対応する具体的な経営プロセスにおける役割については議論していない。本研究で論ずるロジックモデルは、行政上の経営目標に対してどのような予算の使い方、事業や施策が適切なのかを説明できる論理性を示しているだけではなく、その内容の妥当性を評価するための基準でもあり、また、経営システム全体も示している点でもきわめて重要である。

ロジックモデルとは、最終的な成果（ここでは「顧客満足度の向上」や「道路通行車のリスク軽減」等）を設定し、それを実現するために、具体的にどのような中間的な成果が必要か、さらに、その成果を得るためには何を行う必要があるのかを体系的に明示するためのツールである。すなわち、評価対象となる施策、事業を実施することによって、どのような影響があり、最終的にどのような成果を上げていくのかについて、複数の段階、手順に分けて表現しつつ、それぞれについて一連の関連性を整理、図式化することにより、施策や事業の意図を明らかにするものであり、以下のように定義される。

- 1) ロジックモデルは、社会システムあるいは行政経営システムの経営目標としてのアウトカムに対して、経営資源の活用方法や事業、サービス、施設等のアウトプットがどのように関係し、貢献するかを論理的に表した体系図あるいは論理モデルである。
- 2) 体系図あるいは論理モデルの形態を持っているが故にロジックモデルは経営システムの構造そのものを示している。
- 3) ロジックモデルは、定性的な関係を示すとともに定量的な関係を示すこともできることから、経営システムの経営目標に対する達成度評価、パフォーマンス評価のツールとして機能する。
- 4) ロジックモデルは一定の社会環境、事前環境、技術環境のもとで構築される経営システムの構造を示している。

従って、行政経営における経営システムの確認あるいは見直しのツールとして機能する。ロジックモデルは NPM 理論を支援する基本的ルールとして定着しており、行財政改革の実践の中で適用されてきた実績を持っている。わが国においても、政府各省庁において、政策評価活動のための基本計画が作成されている。しかし、現在のところ、ロジックモデルを用いて、目標、政策を体系化するまでには至っていない。これに対して、欧米諸国ではロジックモデル作成のマニュアルも提案され、特にアングロサクソン諸国において幅広く適用されてきた。また、アセットマネジメントの分野においても、オーストラリア等においてロジックモデルの適用事例が報告されている[7]。また、ロジックモデルは、表2-1に示すように具体的な活動から最終的な成果に至るまでの中間段階で起こりうるであろう様々な出

来事を要素として示し、それら要素間の関係を1本もしくは複数の線で繋げることによって、成果達成のための道筋、手順を明らかにする役割を果たす。施策や事業対象の変化、改善度合いを表すアウトカムについては、数段階（例えば、中間、最終の2段階）にブレイクダウンして表現する方法が示されている[8]–[14]。

ロジックモデルの形式的な特徴としては、1) 活動（投入資源）から最終的な成果に至るまでの過程を1本もしくは複数の線によってつなげる、2) 成果の段階を複数段階に分けて提示する、という2点により、ブラックボックスになりがちである施策や事業の成果導出過程を誰の目にも明らかな形で示することができる点にある。

表2－1 ロジックモデルの要素（坂井(2007)⁸⁾）

要素	内容
インプット (資源、活動)	予算、人員等、施策を実施するために投入される資源および活動
アウトプット (結果)	職員の活動が行われたことによって生み出される結果
中間アウトカム (成果)	活動、結果がなされたことによって生じる、比較的短期間で顕在化する(であろう)成果
最終アウトカム (経営目標)	その施策が目指している最終的な成果。一般に、達成されるまでに長い期間を要し、施策の枠を越えた外的要因に影響されることもある



欧米諸国で採用されているロジックモデルを、その表現形式で分類すると、図2－7、図2－8に示すように大きく2つに分類できる。1つはフローチャート型であり、もう1つはブロック型である。いずれの形式も、複数の行政活動（資源）を出発点として、最終成果を到達点とする点では変わりはないが、前者では個別の出来事の要素をそれぞれ別個の箱に表現して、要素単位でのつながりをみているのに対して、後者では同じレベル（例えば、活動、結果、各成果等、それぞれの段階）にある複数の出来事を束ねて、1つの箱に表現して、ブロック単位でのつながりをみている。これらの形式については特にどちらが優れているというものではなく、作成しやすい方、もしくは後の利用状況を想定して形式を選択することになる。

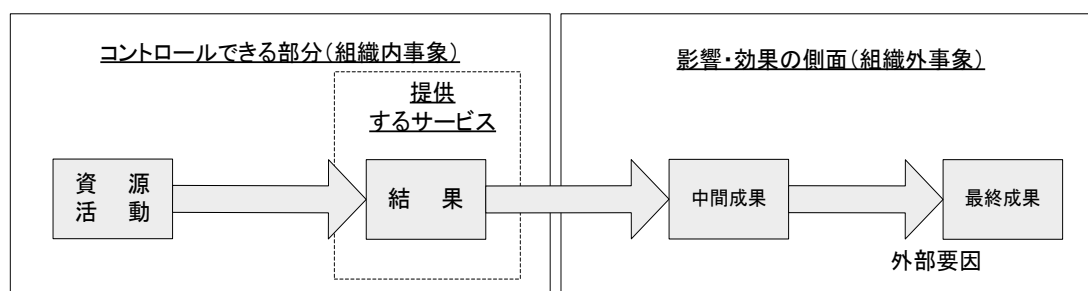


図2－7 ブロック型ロジックモデル

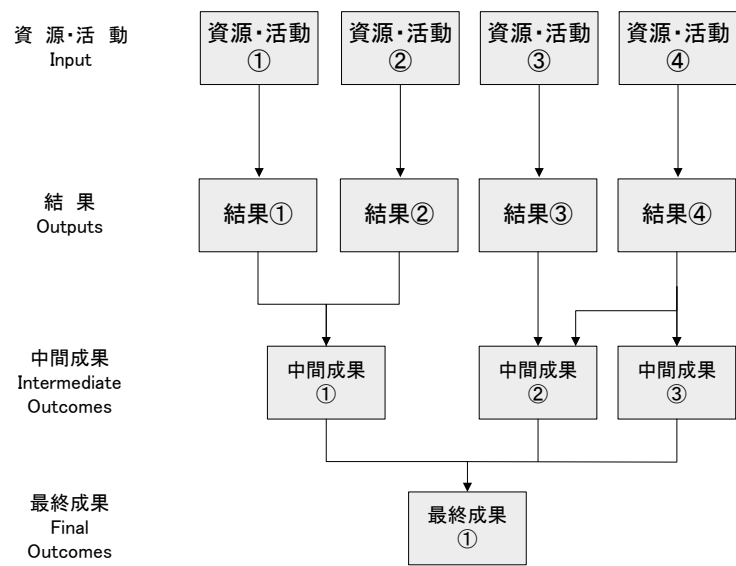


図2－8 フローチャート型ロジックモデル

なお、ロジックモデルを作成する際には、プログラムの成果に影響を及ぼす外部要因も、可能な限り詳細に明らかにしておく必要がある。特に、フローチャート型での下段、ブロック型での右列に行けば行くほど、外部要因が影響を及ぼす度合いが大きくなるため、あらかじめロジックモデルの中に組み入れておく必要がある。一方、ロジックモデルを作成することの最大の利点は、プログラムの立案者、実施者、管理者、評価者、住民、利害関係者等の様々な主体が、プログラムが必要なのか、成果があがるのか、あがらないのか、そして原因はどこにあるか等の本格的な政策論争を1つのロジックモデルを共有題材として、容易に行うことが可能になることである。こうした試行錯誤のプロセスを通じて、施策が意図している目的と、実際に行う活動との間を結ぶ「論理性」、「因果関係」が、より強固に証明されることになるのである。ロジックモデルの様々な利点を整理すると表2－2に示すことができよう。

表2－2 ロジックモデルの利点

段 階	利 点
全体像の提示	最終成果を達成するために、何を行うのか（行うべきか）の全体像がわかる 作業から最終成果に至るまでに発生するであろう様々な出来事が、論理的かつ網羅的に予測、提示される
詳細分析(事前)	最終成果を達成するための重要な要因とそれを担うべき主体が特定され、代替案を検討、分析することができる 最終成果の達成可能性が明らかになるとともに、施策に関与している組織間の共同、協力関係が表示される
詳細分析(事後)	プログラムの成果を、何をもって測定すればよいかわかる 中間成果の表示により、最終アウトカムが達成されない場合の問題の所在が特定でき、どこを改善すべきかがわかる
その他	作成のプロセスを通じて、意識の統一が図られる 情報公開をすることで、外部に対するコミュニケーションツールとなる

2.2.3 ロジックモデルの構築

日常維持管理業務が最終的には道路利用者の走行安全性を確保するために行う作業であることは、これまでも概念的には理解されてきた。しかし、その因果関係に関しては、これまでも担当各個人や部署レベルにおいて概念的には意識されてきたものの、体系的、組織的に整理されたものはなかった。

従って、同一の維持管理業務でも路線や時期によってリスク管理水準が変動したり、異なる維持管理業務間でリスク管理水準の整合性が図れていなかったりという問題が発生する可能性があった。

本研究では、維持管理業務全体のリスクマネジメントを効果的に実施することを目的として、維持管理業務全体をリスク管理目標、手段体系として整理し、維持管理業務において達成すべきリスク管理水準とそれを実施するための維持管理業務の内容をロジックモデルにより表現することとした。ロジックモデルにおいては、インプットを日常維持管理業務の活動状況、頻度、最終アウトカムを道路利用者が享受する「走行時の安全性の確保」等とし、中間段階で考えうる因果関係を中間アウトカム指標やアウトプット指標を用いて可能な限り定量的に評価できるように体系化した。さらに、インプットとアウトカムの関係を定量的に評価するために政策評価モデルの開発を試みた。ここで、都市高速道路管理者の経営目標としては、お客様に安全で安心してさらに快適に走行していただくよう心がける必要があり、最終目標つまり最終アウトカムとしては安全、安心、快適な道路管理を行う必要がある。

安全、安心に関するロジックモデルとしては、構造物の管理責任に係わるものを抽出した。ユーザーの立場からみた場合、道路構造物の安全性に関して望むことは、「道路走行に関する安全性」、「道路走行時の構造物に関する信頼性」、「災害時の道路機能に関する信頼性」がある。ここでは、それらユーザーの立場からみた最終アウトカムに対して、道路管理者の立場からみた事象（中間アウトカム：リスク）を想定し、中間アウトカムから最終アウトカムを総合的に評価できる指標として、最終アウトカム指標を設定した。また、快適性に関するロジックモデルとしては、ユーザーのより一層の満足を高めることができると思うサービスに係わるものを抽出した。ユーザーの立場からみた場合、道路構造物の快適性に関して望むことは、「道路走行に関する快適性」、「構造物等の美観」、「道路走行時における渋滞情報等の提供による快適性」がある。ここでは、最終アウトカム指標として顧客満足度調査を設定した。

さらに、経営管理目標として、適正な料金水準のもとで経営の安定を確保し、高速道路の建設、管理を行っていくため、より一層の経営の合理化、コスト縮減に努める必要がある。ここでは、維持管理に関わる費用を、中長期的な補修を念頭に置いた「LCC」と、日常の維持を念頭に置いた「管理コスト」に分類し、それらの削減を目指すため、「維持管理業務の最適化」を最終アウトカムとして設定した。

図2-9に阪神高速道路株式会社における日常維持管理業務に着目し構築したHELM（阪神高速維持管理ロジックモデル）を示す[13]。HELMは、わが国におけるすべての都市高速道路の日常維持管理業務に適用することが可能であるといえよう。

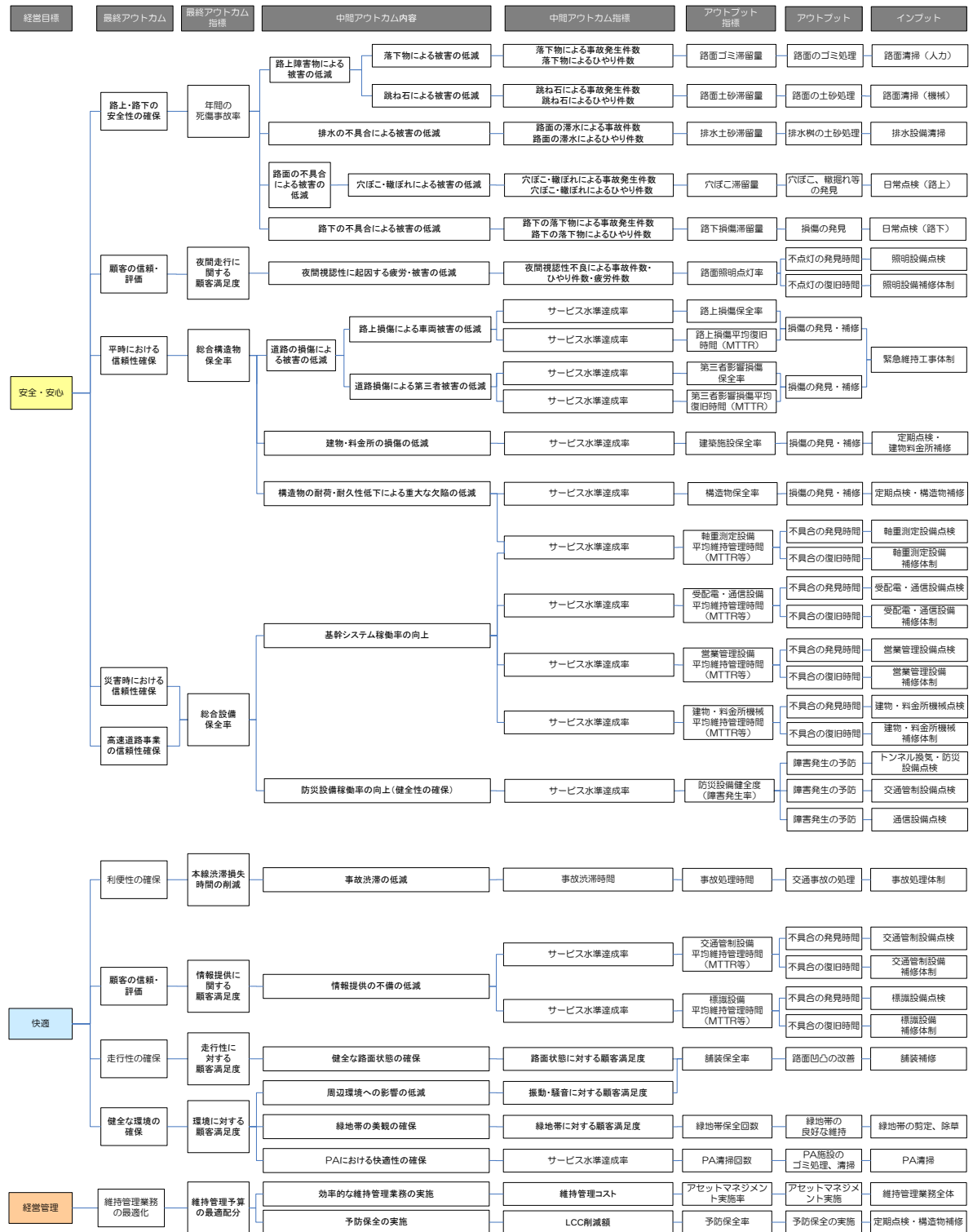


図2-9 HELM（阪神高速維持管理ロジックモデル）の全体樹形図

ロジックモデルの構築、各指標値の算出から、日常維持管理業務内容の見直しに到るまでのフローを図2-10に示している。

維持管理業務におけるPDCAサイクルは、ロジックモデルを作成することに始まるが、ロジックモデル作成の段階では、最終アウトカムを効果的に実現するために、中間アウトカム指標の間に優先順位を設けたり、パフォーマンスの最大化を達成するようなインプットを選択したりすることが重要となる。

PDCAサイクルでは、年毎、月毎等の間隔で、定期的にロジックモデルの中間段階にある各指標を計測することにより、アウトプット指標やアウトカム指標の達成度やその変化を評価することになる。その際、当初ベンチマークとして設定していた指標値との乖離が見られた場合、アウトカム指標、アウトプット指標、およびインプット指標の因果関係を再評価し、必要であれば因果関係の見直しや、インプット指標の再選択を行うことが求められる。

このようなPDCAサイクルを通じて、維持管理業務の継続的改善を図るとともに、あわせて利用者や国民に対する説明責任の向上を図ることが可能となる。

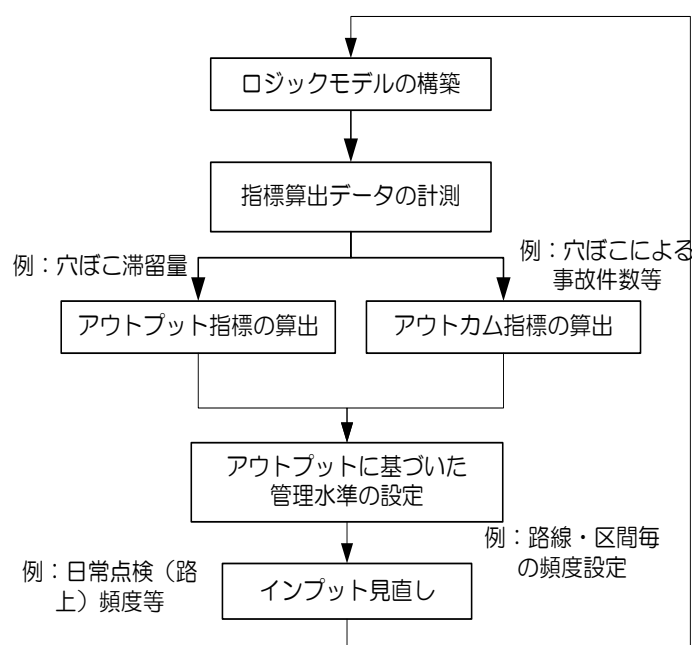


図2-10 日常点検における維持管理のPDCAサイクル（坂井(2007)¹⁰⁾）

2.2.4 業績評価計画の策定

ロジックモデルを構築する場合、すぐに大きな壁に直面する。最終目標や中間目標の具体的な状態を表現するアウトカム指標のデータがとれず、因果関係の分析ができないためである。ロジックモデルを構築するためのデータはほとんどが現場でなければ収集できないものである。統計書等によって整理さ

れているデータを用いることもあろうが、そんなに多くはない。ロジックモデルを構築するためのデータがあらかじめ用意されているケースはほとんどない。

また、ロジックモデルを構築するにあたり、最終目標と中間目標、また中間目標とアウトプット間の全ての因果関係を分析していくとなると、データ収集の困難性に加えて、その分析に要する時間やコストは膨大なものになり、ロジックモデルの構築そのものが難しくなってしまう。

このような状況を回避していくためには、日々の業務活動の中でデータを計画的に収集しながら因果関係の分析を積み上げていくのがよい。そこで、表2-3に示すように「評価計画」をマネジメントプロセスの中に組み込むことにより、最終目標、中間目標、そして事業からなるロジックを構築していく中で、何を重点的に検討しなければならないか、それを解決するためには何を知らなければならないのか、それをどのようにして知るのか、またそのためのデータがどこに所在し、それをどのようにして入手し、どのようにして分析、説明していくのか等をあらかじめ計画として定めておくのである。

表2-3 評価計画の内容

	最終目標	アウトカム		アウトプット	インプット
		長 期	短 期		
評価内容					
評価指標					
情報, データの所在					
収集方法, 時期					
分析方法					
結果の整理					

評価計画を定めることによって、事業を計画し、実行し、評価するマネジメントサイクルを実践していくことになるが、評価計画に沿って実施段階では必要なデータを収集し、または実効性を確認し、評価段階では収集したデータ等による因果関係（確実性）の強さや効果の大きさ等について分析を行うことにより、ロジックモデルを何度も見直しているような段階にまで至れば、多くの検討事項が既に解決され、そのうえでより詳細な検討を計画的に行うことが可能となる。より確実な成果へとつながっていくはずである。

一方、ロジックモデルの検討の中で、最終目標、中間目標間等の因果関係や効果の大きさ等、既に関係が明確になっているものもある。しかし、より効果的効率的な手段を導き出そうとすれば、疑問となる点も多く出てくるはずである。効果的な中間目標と事業の組み合わせや他の中間目標と事業との比較に留まらず、個々の事業レベルにおいても、実施のタイミング、実施主体の取り組み姿勢、実施主体の

性格の問題等、事業の運用方法に関わるところまで次第に関心が広がってくる。

評価計算の策定で何よりも大切なのは、このような疑問に感じていることを整理し、評価によって何を知りたいのか、またその結果を何に用いるのかといった問題意識を明確にすることである。そして、その問題意識を質問形式で整理しておけば、何のために評価を実施するのかについて、誰にでもわかりやすく説明することができる。但し、評価には相当の時間とコストが必要となることを前提に考えなければならない。作成したロジックモデルについては、インプットからアウトプット、アウトプットからアウトカムというロジックが正しいかどうかを継続的に調査し、新しいデータを付け加えながら、ロジックが正しいかどうかを継続的に調整し、新しいデータを加えながらロジックモデルを改善していく必要、すなわち政策評価を実施していく必要がある。

以下にロジックモデルの評価、改善検討の考え方を示す（図2-11）。

1) プロセス評価

評価、改善サイクルの前提とし、清掃、点検、保守等の実施状況を確認し、計画通りの行動が行われたかどうかの監査を行う。

2) アウトプット評価

実施されたインプット（清掃、点検、保守等）の量と得られたアウトプットの関係性を把握し、インプットに対して適切なアウトプットが得られているかどうか評価する。また、路線毎、場所毎のアウトプットを集計し、傾向を評価する。

3) インプットの削減可能性の評価

目標とするアウトカムが得られている場合でも、インプット、アウトプットを削減する余地を検討する。また、路線毎にアウトプットが大きく異なる場合は、インプットの調整を検討する。

4) アウトカム評価

地域や区間毎に苦情件数の調査や利用者側の満足度調査等を行い、目標とするアウトカム（成果、影響）が得られているかどうかを評価する。

5) インプットの見直し

目標とするアウトカムが達成できていない場合、その原因を検討したうえでインプット、アウトプットの見直しを行う。

6) 経営管理上の評価

見直したインプットに必要とするコストと、それによって改善されるアウトカムの関係が経営管理上適切かどうか判断し、必要に応じて再度インプットの見直しを行う。

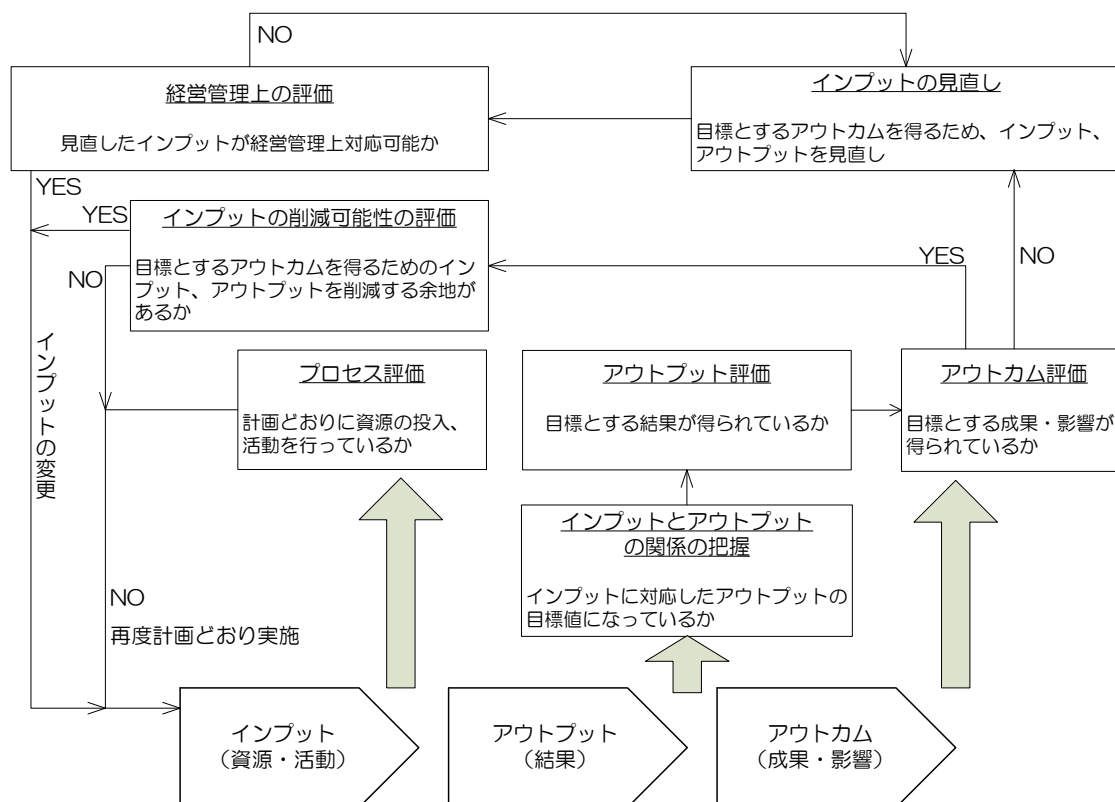


図2-11 維持管理業務の評価, 改善検討

2.2.5 評価指標値の設定

2.2.1において、構築したロジックモデルにおける各評価指標において定義するとともに、定量化するものである(表2-4)。なお、各指標のうち「Sランク損傷」とは、点検時において機能低下が著しく、第三者への影響をきたす恐れがあることから、損傷が発見されてから緊急的に補修を行う判定ランクおよび「Aランク損傷」とは、機能低下があり補修を行う必要がある判定ランクとして定義する。

1) 安全・安心に関わる指標の定義（アウトプット指標）

a) 路面ゴミ滞留量

路面ゴミ滞留量は、単位延長あたり何 m^3 の土砂が路面に滞留しているかを表した指標(m^3/km)であり、以下の式により算出される。路線毎、交通量毎等に区分した単位毎に、計測、評価する。

$$\text{路面ゴミ滞留量 (m}^3\text{/km} \cdot \text{回)} = \frac{\text{年間路面ゴミ回収量 (m}^3\text{/年} \cdot \text{km)}}{\text{路面清掃 (人力) 頻度 (回/年)}}$$

b) 路面土砂滞留量

路面土砂滞留量は、単位延長あたり何 kg の土砂が路面に滞留しているかを表した指標(kg/km)であり、以下の式により算出される。路線毎、交通量毎等に区分した単位毎に、計測、評価する。

$$\text{路面土砂滞留量 (kg/km・回)} = \frac{\text{年間路面土砂回収量 (kg/年・km)}}{\text{路面清掃 (機械) 頻度 (回/年)}}$$

c) 排水土砂滞留量

排水土砂滞留量は、単位延長あたり何 kg の土砂が排水設備に滞留しているかを表した指標(kg/km)であり、以下の式により算出される。路線毎、交通量毎等に区分した単位毎に、計測、評価する。

$$\text{排水土砂滞留量 (kg/km・回)} = \frac{\text{年間排水土砂処分量 (kg/年・km)}}{\text{排水清掃頻度 (回/年)}}$$

d) 穴ぼこ滞留量

穴ぼこ滞留量は、単位延長あたり何件の穴ぼこが存在しているかを表した指標(件/km)であり、以下の式により算出される。路線毎、交通量毎等に区分した単位毎に、計測、評価する。

$$\text{穴ぼこ滞留量 (件/km・回)} = \frac{\text{年間Sランク穴ぼこ発見件数 (件/年・km)}}{\text{日常点検 (路上) 頻度 (回/年)}}$$

e) 路下損傷滞留量

第三者被害を起こす可能性のある損傷が単位延長あたり何件発生しているかを表した指標 (件/回 km) であり、以下の式により算出される。路線毎、交通量毎等に区分した単位毎に、計測、評価する。

$$\text{路下損傷滞留量 (件/km/回)} = \frac{\text{路下S損傷発見件数 (件/km)}}{\text{路下点検頻度 (回/年)}}$$

f) 路面照明点灯率

路面照明点灯率は、点灯時における全照明中の点灯している照明の割合（つまり、照明の稼働率）を表した指標（%）であり、以下の式により算出される。路線毎、交通量毎等に区分した単位毎に計測、評価する。

$$\text{路面照明点灯率 (\%)} = 1 - \frac{\text{不点灯日数 (日)}}{\text{全灯具数} \times 365 \text{ 日}}$$

g) 路上損傷保全率

被害を起こす可能性のある路上の損傷を適切に補修できているかを表した指標（%）であり，以下の式により算出される．路線毎，交通量毎等に区分した単位毎に計測，評価する．

$$\text{路上損傷保全率（\%）} = \frac{\text{発見から1日以内に補修した件数}}{\text{路上Sランクの損傷発見件数}}$$

h) 路上損傷平均復旧時間（MTTR）

被害を起こす可能性のある路上の損傷を適切に補修できているかを表した指標（時間）であり，以下の式により算出される．路線毎，交通量毎等に区分した単位毎に計測，評価する．

$$\text{路上損傷平均復旧時間（時間）} = \frac{\sum (\text{損傷発見時刻} - \text{復旧時刻})}{\text{路上Sランク損傷発見件数}}$$

i) 第三者被害保全率

第三者被害を起こす可能性のある部材を適切に補修できているかを表した指標（%）であり，以下の式により算出される．路線毎，交通量毎等に区分した単位毎に計測，評価する．

$$\text{第三者被害保全率（\%）} = \frac{\text{発見から1日以内に補修した件数}}{\text{路下Sランクの損傷発見件数}}$$

j) 第三者被害平均復旧時間（MTTR）

第三者被害を起こす可能性のある部材を発見した後に，適切に補修できているかを表した指標（時間）であり，以下の式により算出される．

$$\text{第三者被害平均復旧時間（MTTR）} = \frac{\sum \text{発見後補修までの時間}}{\text{路下Sランクの損傷発見件数}}$$

k) 建築施設保全率

建築施設保全率 A ランク損傷が存在しない料金所の割合を表した指標（%）であり，第三者影響にかかる障害の管理水準は「第三者被害保全率」，「第三者被害平均復旧時間」の項目に含め，A ランク損傷以下の障害を対象とする．建築施設の保全（点検，補修）において，留意すべき料金所がどの程度存在しているのかを示す指標であり以下の式により算出される．

$$\text{建築施設保全率（\%）} = 1 - \frac{\text{A ランク損傷のある料金所（箇所）}}{\text{全料金所数（箇所）}}$$

l) 構造物保全率

構造物保全率は、構造物の各部材を適切に補修できているかを表した指標(%)であり、以下の式により算出される。路線毎、交通量毎等に区分した単位毎に計測、評価する。

$$\text{構造物保全率 (\%)} = 1 - \frac{\text{A ランク以上の損傷がある径間 (橋脚) 数}}{\text{全径間 (橋脚) 数}}$$

m) 軸重測定設備平均維持管理時間 (MTTR)

顧客の安全性を確保するために、軸重測定設備が信頼性を持って稼働しているかを表す指標 (時間) であり、複数の維持管理に対する行動が総合的に作用した結果を評価するためのものである。1 次対応 (応急復旧あるいは軽微な障害に対する対応) と 2 次対応 (本復旧あるいは重度の障害に対する対応) 別に評価を行う。復旧時刻は、1 次対応処置時刻、あるいは 2 次対応完了時刻とする。

$$\text{軸重測定設備平均復旧時間 (時間)} = \frac{\sum (\text{障害発生時刻} - \text{復旧時刻})}{\text{障害発生件数}}$$

n) 受配電・通信設備平均維持管理時間 (MTTR)

顧客の安全性を確保するために、受配電・通信設備が信頼性を持って稼働しているかを表す指標 (時間) であり、複数の維持管理に対する行動が総合的に作用した結果を評価するためのものである。1 次対応 (応急復旧あるいは軽微な障害に対する対応) と 2 次対応 (本復旧あるいは重度の障害に対する対応) 別に評価を行う。復旧時刻は、1 次対応処置時刻、あるいは 2 次対応完了時刻とする。

$$\text{受配電・通信設備平均復旧時間 (時間)} = \frac{\sum (\text{障害発生時刻} - \text{復旧時刻})}{\text{障害発生件数}}$$

o) 営業管理設備平均維持管理時間 (MTTR)

顧客の安全性を確保するために、営業管理設備が信頼性を持って稼働しているかを表す指標 (時間) であり、複数の維持管理に対する行動が総合的に作用した結果を評価するためのものである。1 次対応 (応急復旧あるいは軽微な障害に対する対応) と 2 次対応 (本復旧あるいは重度の障害に対する対応) 別に評価を行う。復旧時刻は、1 次対応処置時刻、あるいは 2 次対応完了時刻とする。

$$\text{営業設備平均復旧時間 (時間)} = \frac{\sum (\text{障害発生時刻} - \text{復旧時刻})}{\text{障害発生件数}}$$

p) 建物・料金所機械平均維持管理時間 (MTTR)

顧客の安全性を確保するために、建物・料金所機械が信頼性を持って稼働しているかを表す指標（時間）であり、複数の維持管理に対する行動が総合的に作用した結果を評価するためのものである。1 次対応（応急復旧あるいは軽微な障害に対する対応）と 2 次対応（本復旧あるいは重度の障害に対する対応）別に評価を行う。復旧時刻は、1 次対応処置時刻、あるいは 2 次対応完了時刻とする。

$$\text{建物・料金所機械平均復旧時間（時間）} = \frac{\sum (\text{障害発生時刻} - \text{復旧時刻})}{\text{障害発生件数}}$$

q) 防災設備健全度（障害発生率）

トンネル換気設備等の防災設備が、顧客の安全性を確保するために信頼性をもって稼働しているかを表す指標であり、稼働率（%）により評価する。

$$\text{防災設備機能維持率（\%）} = 1 - \frac{\text{非稼働日数（日）} \times \text{非稼働施設数（台）}}{365（日） \times \text{施設数（台）}}$$

r) 年間の死傷事故率（最終アウトカム指標）

年間の死傷事故率は、ある 1km 区間を自動車 1 億台が走行した時に、その区間で死傷事故の発生する割合であり、以下の式により算出される。

$$\text{年間死傷事故率(件/億台キロ)} = \frac{\text{年間死傷事故件数(件)}}{\text{年間走行台キロ(億台キロ)}}$$

2) 快適性に関わる指標の定義（アウトプット指標）

a) 事故処理時間

発見してから応急措置もしくは完全復旧を講ずるまでの時間で表す。路線毎等に区分した単位毎に、計測、評価する。

b) 交通管制設備平均維持管理時間 (MTTR)

情報提供に関する顧客の快適性を確保するために、交通管制設備が信頼性を持って稼働しているかを表す指標（時間）であり、複数の維持管理に対する行動が総合的に作用した結果を評価するためのものである。1 次対応（応急復旧あるいは軽微な障害に対する対応）と 2 次対応（本復旧あるいは重度の障害に対する対応）別に評価を行う。復旧時刻は、1 次対応処置時刻、あるいは 2 次対応完了時刻とする。

$$\text{交通管制設備平均復旧時間（時間）} = \frac{\sum (\text{障害発生時刻} - \text{復旧時刻})}{\text{障害発生件数}}$$

c) 標識設備平均維持管理時間 (MTTR)

情報提供に関する顧客の快適性を確保するために、標識設備が信頼性を持って稼働しているかを表す指標（時間）であり、複数の維持管理に対する行動が総合的に作用した結果を評価するためのものである。1次対応（応急復旧あるいは軽微な障害に対する対応）と2次対応（本復旧あるいは重度の障害に対する対応）別に評価を行う。復旧時刻は、1次対応処置時刻、あるいは2次対応完了時刻とする。

$$\text{標識設備平均復旧時間 (時間)} = \frac{\Sigma (\text{障害発生時刻} - \text{復旧時刻})}{\text{障害発生件数}}$$

d) 舗装保全率

路面のわだち掘れやひび割れによる不快感が少なく、お客様が快適に感じる舗装の状態の割合を表す指標（%）であり以下の式により算出される。なお、MCIが4以上の面積については、BMSにより抽出する。

$$\text{舗装保全率 (\%)} = \frac{\text{管理延長の内, MCIが4以上の延長 (km)}}{\text{管理延長 (km)}}$$

e) 緑地帯保全回数

緑地帯が、顧客の快適性を確保するために信頼性をもって供用されているかを表す指標（回/年）であり、緑地帯の維持管理作業を実施している回数をその値とする。

f) 回収したゴミ、汚れの量 (PA 清掃)

パーキングエリアが、顧客の快適性を確保するために信頼性をもって供用されているかを表す指標（回/年）であり、パーキングエリアの維持管理作業を実施している回数をその値とする。

g) 工事・事故渋滞時間（中間アウトカム指標）

工事渋滞時間は、工事渋滞が年間どれだけ発生しているかを示す指標（時間）である。路線毎等に区分した単位毎に、計測、評価する。また、事故渋滞時間については、事故渋滞が年間どれだけ発生しているかを示す指標（時間）である。

h) 本線渋滞損失時間（最終アウトカム指標）

工事渋滞，事故渋滞により，どれだけ利用者が時間を損失したかを示す指標であり，以下の式により算出される．路線毎等に区分した単位毎に，計測，評価する．

$$\text{渋滞損失時間 (hr/年)} = \left\{ \frac{\text{年間平均渋滞延長 (km)}}{\text{規制速度 (km/hr)}} - \frac{\text{年間平均渋滞延長 (km)}}{\text{渋滞速度 (km/hr)}} \right\} \\ \times \text{渋滞時ピーク時間交通量 (台/hr)} \times \text{年間渋滞時間 (hr/年)} \times \text{平均乗車人数 (人/台)}$$

i) 利用時間確保率

年間どれだけ阪神高速道路を供用しているかを示す指標（％）であり，以下の式により算出される．路線毎等に区分した単位毎に，計測，評価する．

$$\text{利用時間確保率 (\%)} = 1 - \frac{\Sigma (\text{通行止時間 (hr)} \times \text{通行止延長 (km)})}{365 \text{ 日} \times 24 \text{ hr} \times \text{道路延長 (km)}}$$

j) CS 調査による顧客満足度

顧客満足度は，高速道路の走行性，美観，景観等に関して，利用者がどれほど満足しているのかを示す指標である．清掃，舗装等についての満足度を問う設問について，「わからない」を除く5段階の回答を満足度の高い順（「非常に満足」，「やや満足」，「どちらともいえない」，「やや不満」，「非常に不満」等）にそれぞれ5点，4点，3点，2点，1点と点数を付け，算出対象範囲毎に平均したものである．高速道路全体の快適性に関わる部分に関して，利用者がどれほど満足しているのかを示す指標であり，CS調査によって得られた全顧客満足度の平均を示す．

表2-4 評価指標算出データ一覧

経営目標	指標名	指標内容	インプット	維持管理業務に係わる 管理水準の検討状況		目標管理水準
安全・安心	路面ゴミ滞留量	単位延長あたり何件の路面ゴミが滞留しているかを表した指標	路面清掃(人力)	①	リスク評価	路線毎リスクで規定
	路面土砂滞留量	単位延長あたり何kgの土砂が路面に滞留しているかを表した指標	路面清掃(機械)	①	リスク評価	路線毎リスクで規定
	排水土砂滞留量	単位延長あたり何kgの土砂が排水に滞留しているかを表した指標	排水設備清掃	①	リスク評価	路線毎リスクで規定
	穴ぼこ滞留量	単位延長あたり何件の穴ぼこ(轍掘れ)が存在しているかを表した指標	日常点検(路上)	①	リスク評価	路線毎リスクで規定
	路下損傷滞留量	第三者被害を起こす可能性のある損傷が単位延長あたり何件発生しているかを表した指標	日常点検(路下)	①	リスク評価	路線毎リスクで規定
	路面照明点灯率	点灯時における全照明中の点灯している照明の割合(つまり、照明の稼働率)を表した指標	照明設備点検 照明設備補修体制	②	対応評価	24h
	路上損傷保全率	被害を起こす可能性のある路上の損傷を適切に補修できているかを表した指標	緊急維持工事体制	③	ベンチマーク	現状水準を維持
	路上損傷平均復旧時間(MTTR)			②	対応評価	24h
	第三者被害保全率			③	ベンチマーク	現状水準を維持
	第三者被害平均復旧時間(MTTR)			②	対応評価	24h
	建築施設保全率	料金所において、第三者被害を起こす可能性のある損傷へ移行する恐れのある損傷の発生状況を把握するための指標	建築・料金所点検清掃 建築・料金所補修体制	③	ベンチマーク	現状水準を維持
	構造物保全率	構造物の各部材を適切に補修できているかを表した指標	定期点検・構造物補修	③	ベンチマーク	現状水準を維持
	軸重測定設備平均維持管理時間(MTTR)	軸重測定設備が、顧客の安全性を確保するために信頼性をもって稼働しているかを表す指標	軸重測定設備点検 軸重測定設備補修体制	②	対応評価	設備毎に基準を設定
	受配電・通信設備平均維持管理時間(MTTR)	受配電・通信設備が、顧客の安全性を確保するために信頼性をもって稼働しているかを表す指標	受配電・通信設備点検 受配電・通信設備補修体制	②	対応評価	設備毎に基準を設定
	営業管理設備平均維持管理時間(MTTR)	営業管理設備が、顧客の安全性を確保するために信頼性をもって稼働しているかを表す指標	営業管理設備点検 営業管理設備補修体制	②	対応評価	設備毎に基準を設定
	建物・料金所機械平均維持管理時間(MTTR)	建物・料金所機械が、顧客の安全性を確保するために信頼性をもって稼働しているかを表す指標	建物・料金所機械点検 建物・料金所機械補修体制	②	対応評価	設備毎に基準を設定
	防災設備健全度(障害発生率)	トンネル換気設備等の防災設備が、顧客の安全性を確保するために信頼性をもって稼働しているかを表す指標	トンネル換気設備点検 交通管制設備点検 通信設備点検	③	ベンチマーク	現状水準を維持
快適	事故処理時間	発見してから応急措置もしくは完全復旧を講ずるまでの時間	事故処理体制	③	ベンチマーク	現状水準を維持
	交通管制設備平均維持管理時間(MTTR)	交通管制設備が、顧客の安全性を確保するために信頼性をもって稼働しているかを表す指標	交通管制設備点検 交通管制設備補修体制	②	対応評価	設備毎に基準を設定
	標識設備平均維持管理時間(MTTR)	標識設備が、顧客の安全性を確保するために信頼性をもって稼働しているかを表す指標	標識設備点検 標識設備補修体制	②	対応評価	設備毎に基準を設定
	舗装保全率	路面のわだちやひび割れによる不快感なくお客様が快適に感じる舗装の状態の割合	舗装補修	③	ベンチマーク	現状水準を維持
	緑地帯保全回数	緑地帯が、顧客の快適性を確保するために信頼性をもって供用されているかを表す指標	緑地帯管理	③	ベンチマーク	現状水準を維持
	PA清掃回数	パーキングエリアが、顧客の快適性を確保するために信頼性をもって供用されているかを表す指標	PA清掃	③	ベンチマーク	現状水準を維持

①リスク評価指標: リスクを用いて評価するもの(滞留量など)

②対応評価指標: 対応、体制で評価するもの(MTTR, 保全回数など)

③ベンチマーク評価指標: ベンチマークとして評価するもの(保全率、機能維持率など)

2.3 結言

本章では、“New Public Management”理論に基づく経営目標管理と行政経営システムの概念についてとりまとめるとともに、都市高速道路における経営マネジメントシステムとして、予算執行のマネジメントと政策評価のマネジメントの2つのマネジメントサイクルについて提案するとともに、都市高速道路管理者である阪神高速道路株式会社における維持管理業務を例として、阪神高速維持管理ロジックモデル（HELM：Hanshin Expressway Logic Model）の構築を行った。

予算執行のマネジメントサイクルは、経営レベル、戦略レベル、維持修繕レベルの階層的なマネジメントサイクルに基づき PLAN-DO-SEE-ACTION を実践していくこととともに、政策評価のマネジメントサイクルはロジックモデルに基づいてサイクルが稼働し、必要に応じて、ロジックモデル自体を見直していくものである。また、第4章で述べるとおり、都市高速道路の維持管理業務においては、BMSを用いて、構造物の径間毎や橋脚毎における劣化速度の異質性を分析することによって劣化の進行が速い早期劣化箇所を相対的に評価、抽出するとともに、この抽出された早期劣化箇所が全社的な重点施策となる。このため、本章で提案したロジックモデルの中に相対評価を考慮したロジックモデルの樹形図を再度整理する必要がある。ロジックモデルの整理については、業務の枠組みにも関係することから、第5章で述べることにする。

また、構築したロジックモデルについては、維持管理業務のうち、LCC等による工学的評価が困難な「清掃」、「保守点検」業務を対象とするとともに、土木施設の本体構造物の補修を含む総合的な内容となっており、各々の活動の実施が期待する成果へ至る過程を把握し、定量的な指標、管理水準を設定することで、個々の業務の業績達成度を評価し、最適な規模（頻度、体制）を提示するツールとして適用することを期待している。各管理項目について、インプット-アウトプット-中間アウトカム-最終アウトカムとして各々指標化を行い、ツリー間における因果関係を明確にした。このことにより、何か事象が発生したときの原因がどこにあるのか、といったことが明確になる。

さらに、定量化した各指標について、3種類の管理水準、1)リスク評価によりアウトカムのある目標を達成するように定めたもの、2)業務のパフォーマンス状態を示すためにベンチマーク的に定めたもの、3)業務体制の是非を評価するために事象を処理するための時間を定めたもの（MTTR：Mean Time To Repair）、を設定した。このうち、リスク評価による管理水準の設定手法について第3章で述べることにしたい。

ロジックモデルは阪神高速道路株式会社の維持管理業務を体系化したものであり、設定している指標も多岐にわたる。指標の数が多くなっても、業務における指標の流れは同じになるため、個々の指標を評価しながら業務を進めることになる。

参考文献

- [1] 土木学会：アセットマネジメント導入への挑戦，2005.11
- [2] 大住荘一郎：ニューパブリックマネジメントー理念・ビジョン・戦略，日本評論社，1999
- [3] 大住荘一郎：パブリックマネジメントー戦略行政への理論と実践，日本評論社，2002
- [4] 大住荘一郎：NPMによる行政革命ー経営改革モデルの構築と実践，日本評論社，2003
- [5] W.K.Kellogg Foundation: W.K.Kellogg Foundation Evaluation Handbook,1998
- [6] 財農林水産奨励会・農林水産政策情報センター：ロジックモデル策定ガイド，2003.8
- [7] Australia NSW Government Asset Management Committee: Total Asset Management Manual, 1992.
- [8] 坂井康人，西林素彦，荒川貴之，小島大祐，小林潔司：高速道路の効果的な維持管理を目的としたロジックモデル（HELM）の検討，第62回土木学会年次学術講演会，2007.
- [9] 坂井康人，上塚晴彦，小林潔司：ロジックモデル（HELM）に基づく高速道路維持管理業務のリスクマネジメント，第27回日本道路会議，2007.
- [10] 坂井康人，上塚晴彦，小林潔司：ロジックモデル（HELM）に基づく高速道路維持管理業務のリスク適正化，建設マネジメント研究論文集，土木学会，Vol.14，pp.125-134，2007.
- [11] Yasuhito SAKAI, Kiyoshi KOBAYASHI, Haruhiko UETSUKA：Risk Evaluation and Management for Road Maintenance on Urban Expressway Based on HELM (Hanshin Expressway Logic Model)，The Fourth International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, pp.574-581，2008.
- [12] Yasuhito SAKAI, Kiyoshi KOBAYASHI, Haruhiko UETSUKA：New Approach for Efficient Road Maintenance on Urban Expressway Based on HELM (Hanshin Expressway Logic Model)，Society for Social Management Systems 2008，pp.1/11-pp.11/11，2008.

- [13] 中林正司, 西岡敬治, 小林潔司: 阪神高速道路の維持管理の現状と課題, 土木学会論文集 vol.6, No.4, pp.494-505, 2007.
- [14] Yasuhito Sakai : Practical Asset Management System of Hanshin Expressway-Logic Model and BMS, 2nd International Workshop on Lifetime Engineering of Civil Infrastructure, pp.239-255, 2007.

第3章

ロジックモデルに基づくリスク評価による管理水準設定

3.1 緒言

第2章では、NPM 理論に基づく経営目標管理と行政経営システムについて検討を行うとともに、これらをふまえて都市高速道路における維持管理ロジックモデルとして阪神高速維持管理ロジックモデル (HELM: Hanshin Expressway Logic Model) [1]–[3]を構築し、各評価項目について指標化するとともに、各項目における管理水準の設定、政策評価について提案を行った。

本章では、企業のリスクマネジメントと内部統制の必要性について述べるともに、第2章において構築した維持管理ロジックモデルを用いて、都市高速における日常的な維持管理項目のうち日常点検（路上点検，路下点検）に着目し、リスクマネジメントの立場から、維持管理業務の効率化、適正化を達成するための方法論について考察する。

リスクの定義は多様であるが、リスクを「被害の起こる確率」と「起こった場合の被害の大きさ」の積として定義する。維持管理におけるリスクとは、点検や補修、清掃等の維持管理を怠った場合に生ずる事故や大規模補修、苦情、管理瑕疵等の発生として考えることができ、維持管理業務のリスクマネジメントの目標、手段体系をロジックモデルとして体系的に整理し、アウトカム指標、アウトプット指標の設定を通じて、維持管理上のリスク水準の適正化について検討する。

すなわち、リスク水準が高い管理項目に関しては、メンテナンスのレベルを上げてリスク軽減を図るとともに、リスク水準が必要以上に低いものについては、管理水準を引き下げることにより、コストを縮減する。それにより、管理施設全体のリスクをバランスよく抑制しつつコスト縮減を達成することができる。

3.2 リスクマネジメントと内部統制論

3.2.1 リスクマネジメントの概要

リスクは、一般には「危険」、すなわち「悪い結果の発生確率」という意味で使われるが、より広く捉えて、良い結果と悪い結果の双方の発生確率を含む「不確実性」と捉えられることもある。

企業にとってのリスクとは、狭義には「企業活動の遂行を阻害する事象の発生可能性」と捉えられるが、現在では、より広く「企業が将来生み出す収益に対して影響を与えると考えられる事象発生の不確実性」として、むしろ、企業価値の源泉という見方で積極的に捉えられるようになってきている。

リスクマネジメントとは、企業の価値を維持、増大していくために、企業が経営を行っていくうえで、事業に関連する内外の様々なリスクを適切に管理する活動である。リスクマネジメントは、もともと、災害の発生に対する対応や金融面における不確実性の管理という観点から生まれ発展してきたものであるが、経済社会における不確実性を管理する必要性が高まってきている中で、現在では、広範なリスクを管理するための活動として理解されるようになってきている。企業は、その目的に従って事業活動を行っていくうえで、社外の経営環境等から生じるリスクのみならず、社内に存在するリスクにも直面している。企業が、その価値を維持、増大していくためには、このようなリスクに適切に対処することが必要である。

リスクマネジメントにおいては、最初に企業の目的や目標の達成に関連して、どのようなリスク要因があるかを発見し、リスクとして特定することが必要となる。リスクの発見および特定は、明示されていない企業の目的や目標に関連するものを含めて、重大な影響を及ぼす可能性のあるものを漏らすことのないよう、包括的に行われなければならない。

特定されたリスクは、それぞれのリスクが顕在化した場合の企業への影響度と発生確率に基づき、企業にとっての重要度を算定されなければならない。また、必ずしも全てのリスクについて定量的に算定することができるわけではないが、リスクの算定は、関係者が納得できる合理的な指標を用いて、統一的な視点で相対的な比較が可能となるよう行われることが望ましい。

例えば、図3-1に示すようにリスクの影響度とその発生確率をそれぞれ「大」、「中」、「小」に区分し、影響度と発生確率の組合せにより評価すること等が考えられる。

この場合、1) リスクの影響度が大きく、かつリスクの発生確率が高いと判断されるリスク、2) 発生確率は低い影響度の大きなリスク、または3) 影響度は小さいが、その発生確率の高いリスク、4) 影響度が小さく、かつ発生確率も低いリスク、という順に優先順位を決定することができ、その結果に基づき対応すべきリスクを決定する。

リスクの評価により対応すべきこととされたリスクを対象として、リスクマネジメント目標を設定し、

許容できるリスク量を定めなければならない。そのうえで、その目標の範囲内に残留リスクが収まるように、リスク対策を選択しなければならない。残留リスクについては、「 $R-C=E$ 」の関係式により決定され、残留リスク E を小さくするには、リスクを減少させる対策 C を強化することが必要となる。

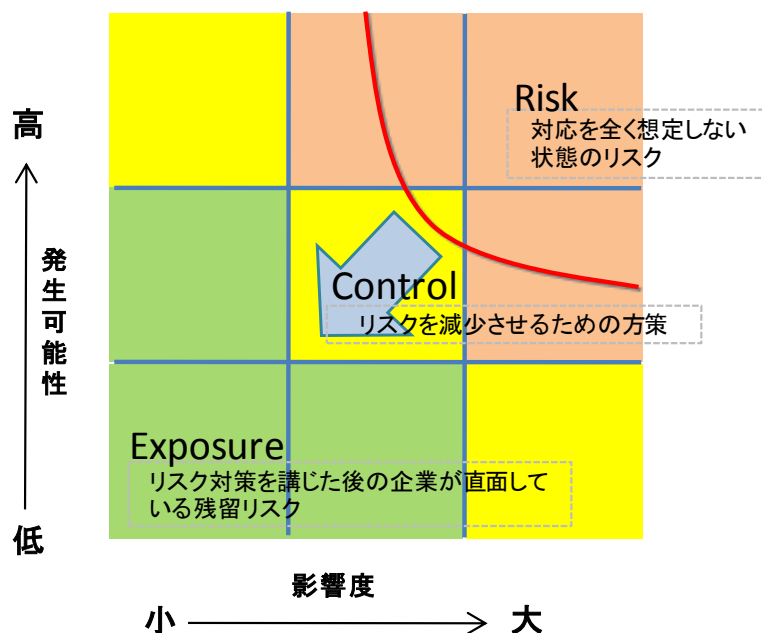


図3-1 リスクの算定、評価イメージ（リスク新時代の内部統制(2003)⁴⁾）

3.2.2 内部統制論

今日、企業の違法行為がそのまま企業の破綻に繋がる事例が増えている。企業が、自らの企業価値を高めるために、利益を追求するだけでなく社会的な責任を果たすことが求められるようになったからと考えられる。

企業の社会的責任をふまえて企業価値を向上させるためには、企業リスクマネジメントのプロセスが要請される。このプロセスが内部統制であり、内部統制とは、企業がその業務を適正かつ効率的に遂行するために、社内に構築され、運用される体制およびプロセスである。その構築、運用の水準は、業務の適正かつ効率的な遂行に合理的に保証を与えることのできる程度まで高められなければならない。内部統制は、市場経済社会において、企業法制が形成するシステム全体が成立するための前提であるが、同時に企業が事業目的の達成に係るリスクを低減させ、持続的に発展していくためにも不可欠である。内部統制は、企業が事業を行ううえで欠かすことのできないものであり、各企業の中で個別に発展してきたが、不正な財務報告に関する事件等を契機として、概念の整理が行われ、1990年代以降、米国において、「内部統制の包括的フレームワーク」、いわゆるCOSO レポートが公表され、2002年7月には米国版SOX法が制定された。

その内容は、財務報告の信頼性のみならず、コンプライアンスや業務の効率性をも包含するものとな

っており、今日における内部統制のあり方に関して、世界のデファクトスタンダードと見なされている。

一方、わが国においても2000年代に入って巨額の粉飾決算事件が続発した。この原因は不正や誤りを防止するための仕組みが不十分であったためであるとの認識から、金融商品取引法改正によって経営者が内部統制の整備状況や有効性を評価した内部統制報告書を作成し、公認会計士等がそれを監視する二重責任の原則に基づいた仕組みが整備され、2006年6月には日本版SOX法が整備された。

内部統制の考え方は、企業の不祥事を契機として検討され策定されたものであるが、現在では、むしろ、企業が業務執行に係る考え方やプロセスを明確化、効率化することにより、ステークホルダー等への責務を果たしつつ、企業価値を維持、増大するために必要なシステムとして評価され、適時見直しが行われてきている。

3.2.3 リスクマネジメントと内部統制構築の必要性

内部統制は、リスクマネジメントを適切に行うために不可欠であり、従って、内部統制はリスクマネジメントを支えるものといえることができる。一方で、内部統制が有効であるためには、それがリスクマネジメントによる総合的なリスクの評価等を踏まえて、構築、運用される必要がある。

適切なリスクマネジメントおよび内部統制は、経営者が各ステークホルダーに対する責務等を果たしつつ、企業価値を維持、向上するために不可欠なものである。この意味で、適切なリスクマネジメントおよび内部統制を構築することは、経営者が経営者たるための前提であるといえることができる。強固なリスクマネジメントおよび内部統制が構築されていることにより、経営者は、より適正で大胆な経営判断を行うことが可能となる。また、リスクマネジメントおよび内部統制は、それぞれが異なる背景を持ち、違った経路を経て発展してきたが、企業を取り巻く様々なリスクに対応し、企業価値を維持、向上するという観点からは、共通の目的を有しており、図3-2のとおり「経営者層」、「管理者層」、「担当者層」の3段階の階層として考えることができよう。

内部統制が適切に機能するためには、経営管理プロセスに、内部統制の基盤である「健全な内部統制環境」および「円滑な情報伝達」が存在していることが必要である。また、内部統制環境とは、企業がその目的を達成するために、企業活動を適正かつ効率的に運営するための価値観、組織、規則等であり、企業構成員の様々な行為の基礎となる。企業構成員の事業活動、それらに関連する指揮監督は、この環境下で行われる。それゆえ、内部統制環境は、事業目標等の策定、経営組織の組成やリスクマネジメント等、広範な範囲に影響を及ぼすとともに、内部統制のその他の構成要素である円滑な情報伝達、コントロールやモニタリングの実行にも影響を及ぼす。

企業は、企業構成員等によって構成される集合体であり、企業構成員が必要な情報を識別、収集、処理し、かつ関係する企業構成員に伝達することによって、初めて企業目的を達成するための業務執行を

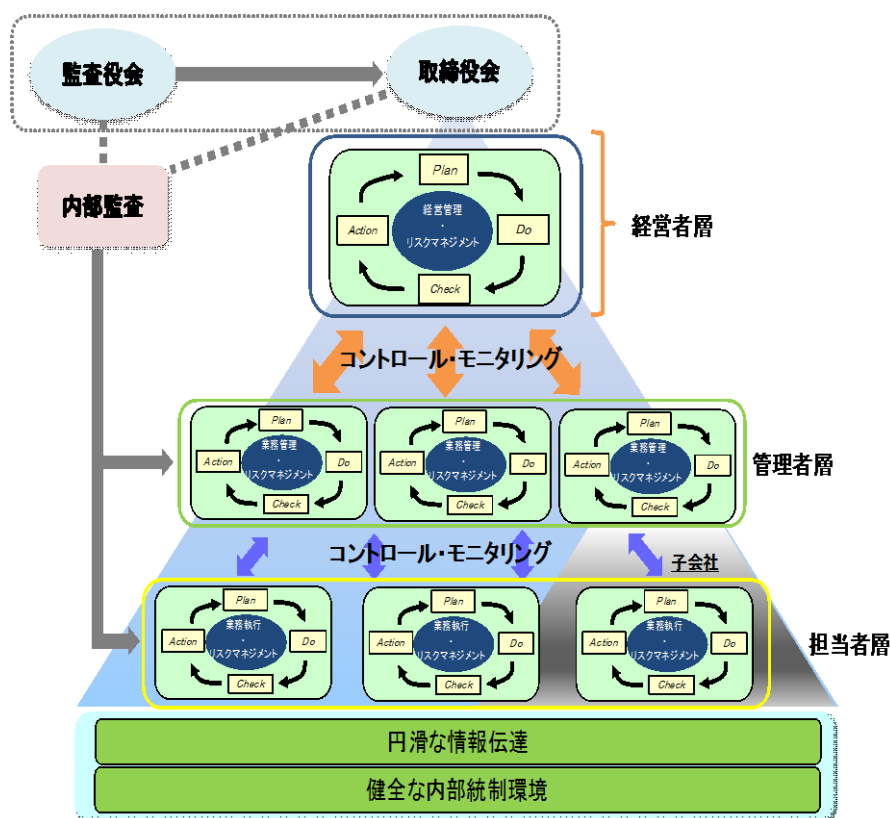


図3-2 リスクマネジメントと一体となって機能する内部統制の階層性

(リスク新時代の内部統制(2003)⁴⁾)

行うことができる。従って、企業が事業活動を適正かつ効率的に遂行するためには、情報の識別、収集、処理および伝達が円滑に行われることが不可欠である。

円滑な情報伝達における情報には、社内で作成された情報だけでなく、社外から得られる業界、経済や規制等に関する情報も含まれる。伝達は、通常、確立された指示命令経路および報告経路によって行われるが、文書によるもののほか、会議、打合せ等の口頭による情報交換等も含まれる。

例えば、業務執行を行ううえで、円滑な情報伝達は、経営者の指示、または権限委譲に基づき、管理者が計画を立て、その実施を担当者に指示し、管理者は担当者から受けた報告を評価したうえで、経営者に報告するという、階層間を跨いだ大きなマネジメントサイクルと、上位の階層からの指示に基づき、各階層内において行われる小さなマネジメントサイクルの組合せにより行われる。

また、円滑な情報伝達のためには、コンピュータシステムやインターネット、イントラネット等のネットワークも重要である。企業規模が大きくなり、業務処理量が多くなればなるほど、コンピュータシステムによる業務データ処理の必要性が高まる。さらに、ネットワークの活用により、電子メール等による社内外の情報伝達も、内部統制上の重要な位置づけを持つようになってきている。今日の企業は、その規模如何にかかわらず、多かれ少なかれその業務処理がコンピュータシステムやネットワークに依存していることから、情報処理および伝達のためのコンピュータシステムは、内部統制環境、コントロール・モニタリング等にも重要な影響を及ぼす[4]。

3.3 維持管理業務におけるリスクマネジメント

リスクマネジメントは、故障や事故をゼロにすることを目的とすることは従来の維持管理手法と同じであるが、それに至るまでのプロセスを明確にし、故障や事故による被害を最小とするように、優先度をつけてメンテナンスしていかなければならない。

2002年7月の米国版SOX法、さらには2006年6月の日本版SOX法の整備により、経営者である取締役会の責任と権限が強化された。企業が直面する様々なリスクに対して、これまでは「分かっている実施しなければ責任が問われる」という考え方が支配的であり、あえて不利なことを明確にしない方が有利であったが、今後は不作為による責任が問われるようになった。

このような背景から高速道路事業に係わる瑕疵が問われたとき、自己の責任とリスクマネジメントの責任を混同しないように注意しなければならない。維持管理業務における事故が発生すれば、企業が世間からの批判を受けるため、維持管理リスクは取締役会において全社的問題として位置づけて取り組む必要がある。

本研究では、維持管理業務におけるリスクを「被害の起こる確率」と「起こった場合の被害の大きさ」の積として定義する。リスクの中で「被害の大きさ」は交通量や施設の重要度に応じてあらかじめ規定される値である。穴ぼこやゴミの滞留量等、路面の状態や健全度により決定される、「被害の起こる可能性」をアウトプット指標とした。ここで、重要度に応じて規定したリスクの許容範囲をサービス水準（要求性能）と考えることができる。維持管理におけるリスクとは、点検や補修、清掃等の維持管理を怠った場合に生ずる事故や大規模補修、苦情、管理瑕疵等の発生として考えることができる。

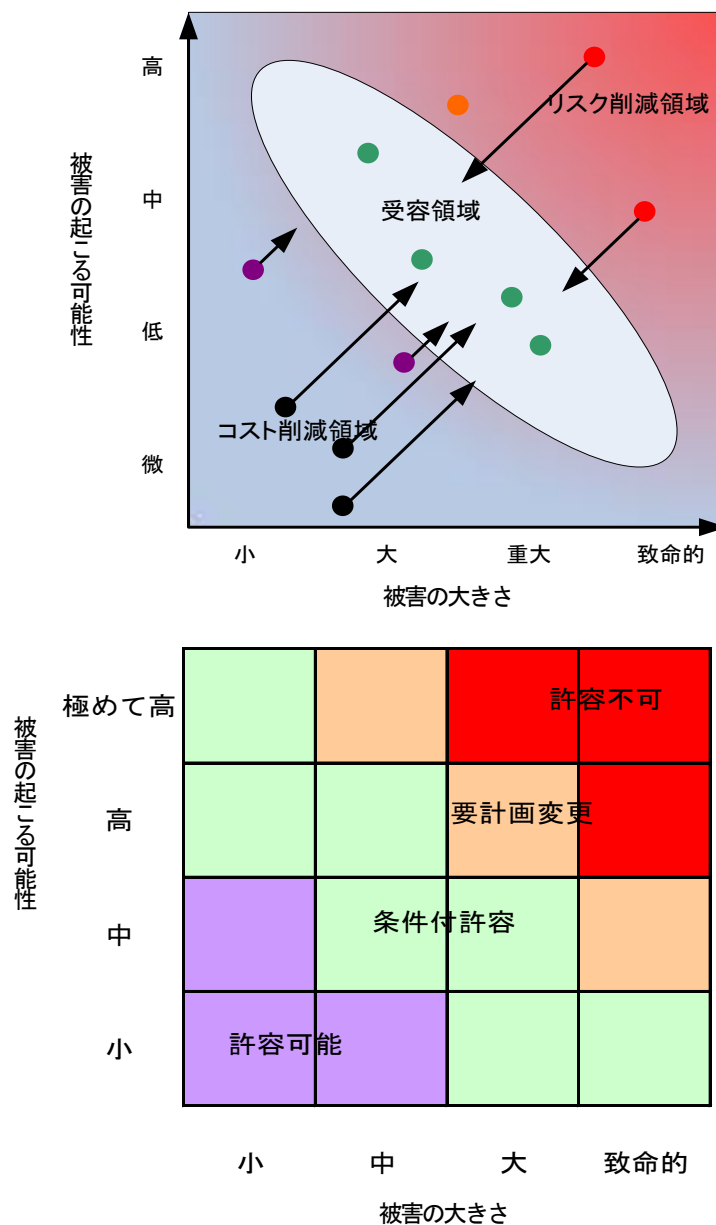
維持管理業務におけるリスクマネジメントにおいては、リスク水準の適正化を図ることが課題となり、点検や補修、清掃等の維持管理を怠った場合の不具合（事故、補修、苦情等）を体系的に整理し、被害の大きさと被害の起こる可能性を軸に各メンテナンス作業の重要度を評価する。

図3-3は、被害が起こる確率と被害の大きさに基づいて、現況における各管理項目のリスクのポジションを例示したものである。図中の受容領域は、道路管理者が望ましいと考えるリスク管理水準を示している。リスク管理水準と比較して、現況のリスクが高いと判断される（リスク削減領域にある）場合、メンテナンス水準を引き上げてリスク軽減を図ることが必要である。逆に、リスクが十分に低い管理項目に対しては、メンテナンスレベルを下げてコストを縮減することが可能となる。それにより、管理施設全体の総リスクを下げつつコスト縮減を実現することができる。

さらに、路線毎で交通量（影響の大きさ）も異なるため、リスクを路線毎で算出し、その総和を路線網全体のリスクとすることとした。すなわち、路線網全体のリスクを、

$$R = \sum_i (P_i \times C_i) \quad (3.3.1)$$

と表す。ここで、 R は、ある管理項目に関するリスクを、 P_i は路線区間 i ($i=1,2,...,n$)で、対象とする管理項目に不具合が発生する確率、 C_i は路線区間 i において不具合が発生した場合の影響の大きさを表す[5]–[10]。



許容可能
条件付許容
要計画変更
許容不可

法定検査以外の対応不要
現状の点検やメンテナンスを次回まで継続
点検回数を増やすなど何らかの対策が必要
直ちに対策を実施する

図3-3 リスク適正化のイメージ (坂井(2007)⁶⁾)

3.4 管理水準の設定方法

維持管理水準を設定するためには、明確な根拠が必要となる。今、図2-10に示したHELMにおける最終目標「路上走行の安全性の確保」に着目しよう。この最終目標を達成するためには、事故や管理瑕疵の発生（中間アウトカム）を低減もしくはゼロにする必要がある。そのとき、不具合の発生（アウトプット）をどの程度低減させる必要があるのかをロジックモデルに基づいて関連づけることにより、管理水準を設定することが重要となる。

ある管理項目に対する不具合の発生（アウトプット）と事故や管理瑕疵の発生（中間アウトカム）の状況を路線毎、もしくはさらに詳しく路線内の区間毎に調査し、不具合の発生と事故、管理瑕疵の発生の関係を分析する必要がある。しかし、「不具合が何件以上発生したときに事故や管理瑕疵が発生する」といったように確定論的な分析結果は得られるとは限らない。そこで、過去に蓄積してきた統計データを用いて、例えば、1年間管理瑕疵が発生しなかった路線を抽出し、それらのリスクの平均値を管理水準と設定することにより、「今後管理瑕疵を発生させない」という目標に基づいた維持管理を行うことができる。その際、対象とする管理項目に関するリスクの発生特性を考慮し、リスク管理水準を決定する必要がある。リスク管理水準の設定手順を図3-4に整理する。

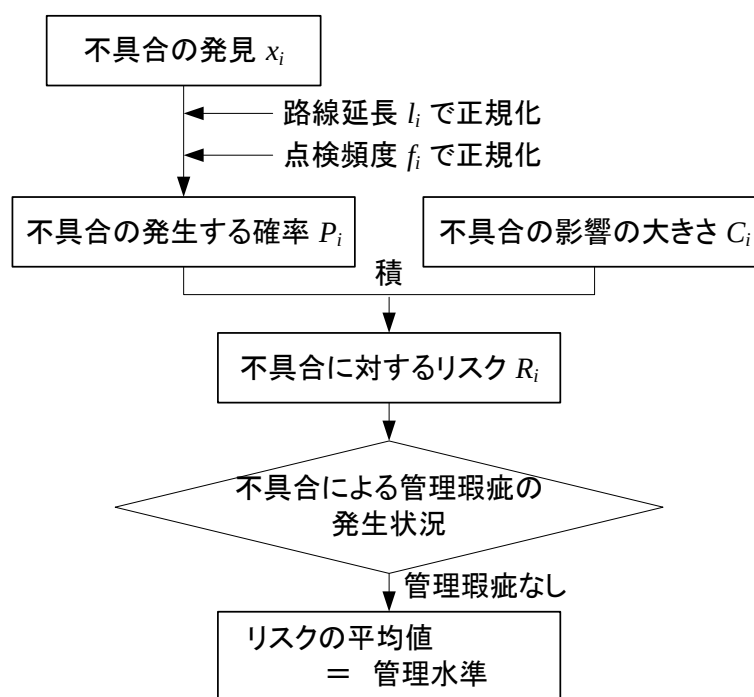


図3-4 管理水準設定の流れ（坂井(2007)⁵⁾）

3.5 リスク適正化の方法

ある管理項目のリスクマネジメントを実施する際、1) リスクを望ましい範囲内にコントロールする、2) 維持管理業務に要する費用を低減する、という2つの目標をとりあげる。これらの目標は、互いにトレードオフの関係にあるが、それぞれ以下の制約条件のもとで目標の達成を目指すこととなる。

$$|R_{level} - R_i| \leq R_{margin} \quad (3.5.2)$$

$$\sum_i Cost'_i \leq \sum_i Cost_i \quad (3.5.3)$$

$$\sum_i R'_i \leq \sum_i R_i \quad (3.5.4)$$

ここで、 R_{level} は設定したリスク管理水準、 R_i は路線*i*のリスク値、 R_{margin} は管理水準のマージン、 $Cost_i$ は路線*i*の維持管理業務に発生するコスト、 $Cost'_i$ はリスク適正化後の路線*i*の維持管理業務に発生するコスト、 R'_i はリスク適正化後の路線*i*のリスクである。

管理瑕疵の発生状況をもとにリスクによって管理水準を定めようとした場合、「あるリスク R_{level} を保てば管理瑕疵が発生しない」という明確な線引きは困難である。このため、ある水準からばらつき等も考慮して安全側、危険側にマージンを設定し、これら上下のラインに挟まれる帯状の領域を道路管理者として目指すべきリスク管理水準の範囲と定義することとした。

図3-5において、(A)の領域にある路線は「過剰に管理されている」と考えることができ、コストの面から見ると現状の管理水準を下げてもよい領域である。一方、(B)の領域にある路線は現状のリスクが高いため、管理水準を上げる必要がある。もちろん、リスクとコストの間にはトレードオフの関係が成立する。リスクとコストの両者を下げるためには、路線毎のインプットを見直す必要がある。

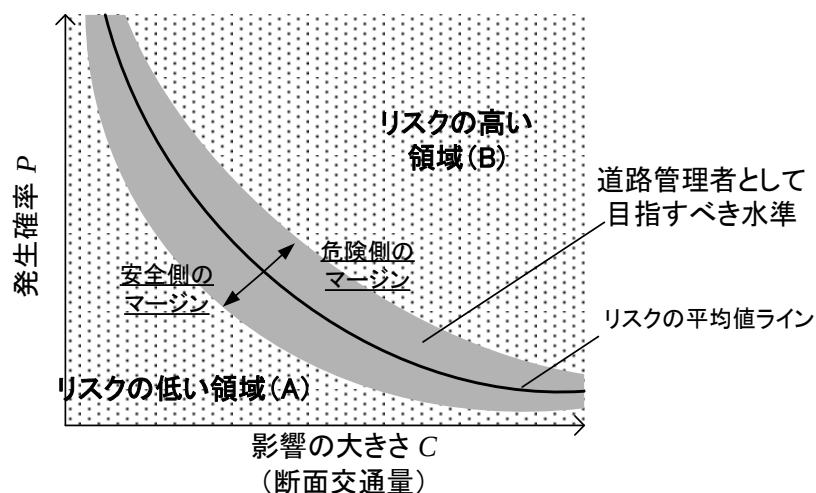


図3-5 リスクカーブの概念図 (坂井(2007)⁵⁾)

3.6 日常点検（路上）の評価

HELM を構成する政策評価モデル群の中で、日常点検によって発見される穴ぼこ（緊急を要する舗装の損傷）に関連する政策評価モデルに着目しよう。まず、ロジックモデルを用いて、穴ぼこに関するリスク管理水準を設定する。

HELM では、穴ぼこ発生に関するリスクを制御するインプットとして日常点検（路上）の頻度を採用している。現況の点検頻度は、路線や区間により異なるが、2005 年度の実績は2～3（回/週）であった。2002 年度、2004 年度、2005 年度に、日常点検（路上）で発見された穴ぼこ件数を図3－6に示している。この図に示すように、路線や区間により穴ぼこ発生リスクは多様に異なっている。そこで、穴ぼこ発生件数を路線延長、点検頻度で除した穴ぼこ滞留量（件/回/km）をアウトプット指標として採用している。図3－7に穴ぼこ滞留量、図3－8に管理水準設定の流れを示す。

路線や区間によって交通量が異なるため、穴ぼこによる影響（事故や管理瑕疵）の大きさも異なる。そこで、穴ぼこ滞留量を発生確率、交通量を影響の大きさと考え、穴ぼこ滞留リスクをと定式化する。

$$R_{pi} = P_{pi} \times C_i \quad (3.5.5)$$

ここで、 R_{pi} は路線*i*の穴ぼこ滞留リスク値、 P_{pi} は路線*i*の穴ぼこ滞留量、 C_i は24時間平均断面交通量である。

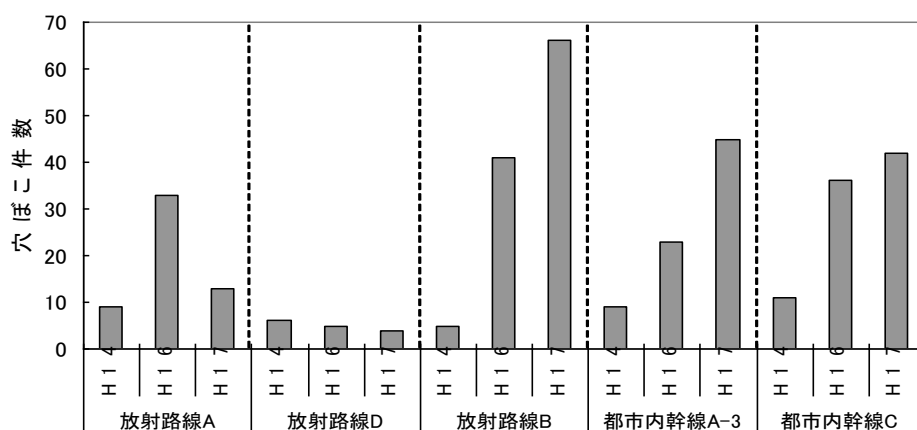
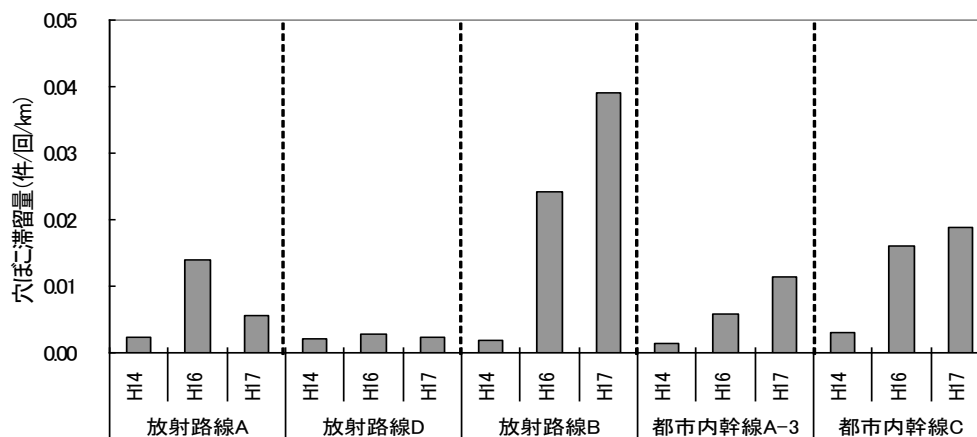
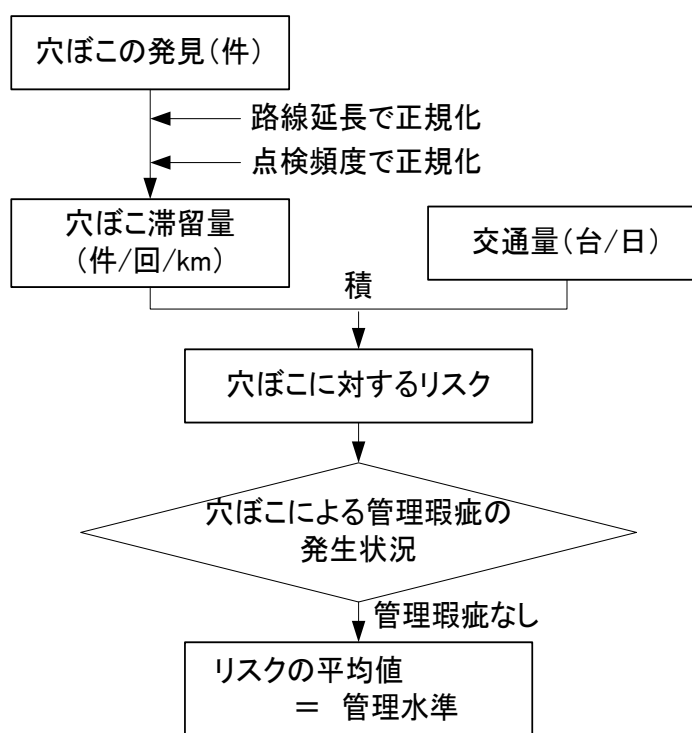


図3－6 穴ぼこ発見件数（坂井(2007)⁶⁾）

図3-7 穴ぼこ滞留量 (坂井(2007)⁶⁾)図3-8 管理水準の設定の流れ (坂井(2007)⁶⁾)

穴ぼこ滞留量は、日常点検（路上）により1年間に発見された穴ぼこ件数を路線延長および点検頻度で正規化した値であり、

$$P_i = x_i / f_i / l_i \quad (3.5.6)$$

で定義される。ここで、 x_i は、路線*i*の年間穴ぼこ発見件数、 f_i は年間日常点検（路上）頻度、 l_i は路

線延長である。

ここで、穴ぼこ滞留リスク値が一定となるような穴ぼこ滞留量と断面交通量の組み合わせが、図3-7に示すような双曲線で示されることに留意しよう。図3-9において、双曲線より右上の領域にある点は、双曲線で表される管理水準に対して、穴ぼこ滞留リスクが高いことを意味する。すなわち、ある一定のリスクに該当する穴ぼこ滞留リスクの管理水準を決定すれば、路線や区間毎で点検を重点化し、穴ぼこ滞留リスクの平準化を図ることができる。

穴ぼこの管理瑕疵に着目して、リスクの適正化を試みた。最終目標として、「今後も管理瑕疵の発生をゼロにする」を設定し、阪神高速道路株式会社として目指すべき管理水準(中間アウトカム)を「これまで維持管理してきた路線の中で、管理瑕疵件数がゼロであった路線(=2002年度、2004年度、2005年度の32路線区間)のリスクの平均値」と設定した。穴ぼこ滞留に関する管理水準は、

$$R_{p,level} = \frac{\sum_i R_{p0i}}{n} \quad (3.5.7)$$

と設定した。ここで、 R_{p0i} は管理瑕疵件数がゼロであった路線の穴ぼこ滞留リスク値とする。ここで、管理瑕疵の発生状況をもとにリスクによって管理水準を定めようとした場合、「あるリスクを保てば管理瑕疵が発生しない」という明確な線引きは困難である。穴ぼこについては、日常点検だけではなく交通パトロールによっても発見、対応されていることから、設定した目標リスク水準に対して、パトロール等による穴ぼこ発見も考慮し、安全側、危険側にマージンを設定し、これら上下のラインに挟まれる帯状の領域を阪神高速道路株式会社として目指す管理水準と設定することとした。

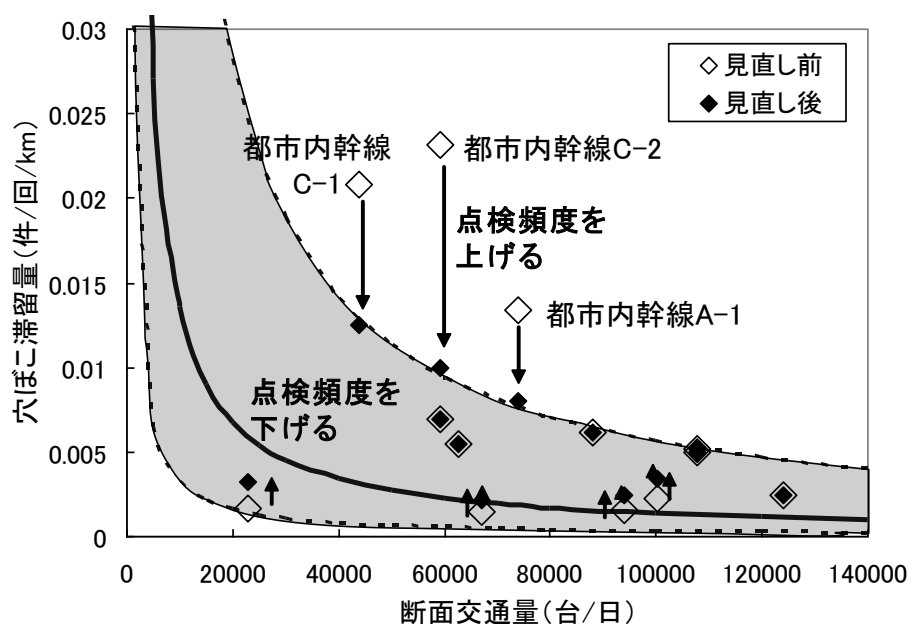


図3-9 リスクに基づく見直し (坂井(2007)⁶⁾)

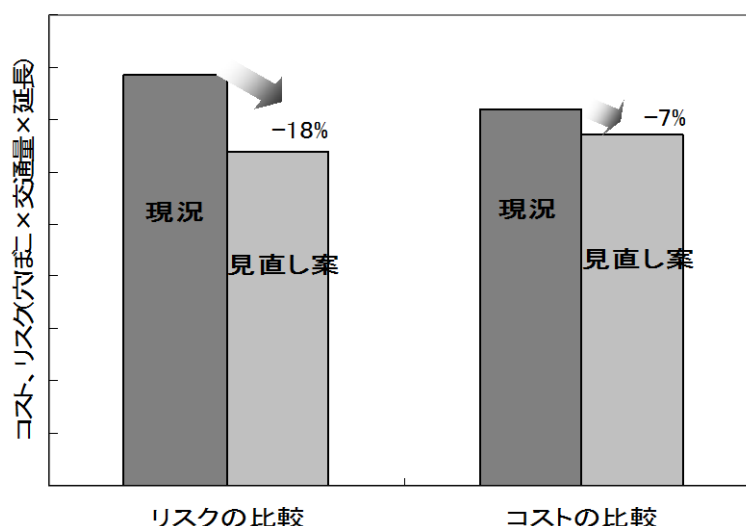


図3-10 見直しによるリスクとコストの縮減 (坂井(2007)⁶⁾)

さらに、設定した管理水準に対し、穴ばこの管理瑕疵に着目してリスクの最適化を行った。ここでは、今後も「管理瑕疵の発生をゼロにする」ことを目標に設定し、阪神高速道路として目指すべき管理水準を「これまで維持管理してきた路線の中で、管理瑕疵がゼロであった路線のリスクの平均値」と設定し、リスクの高い路線については点検頻度を上げて目標とする水準に近づけることとした。

一方、リスクの低い路線については、管理コスト縮減のために点検頻度を下げることであった。このとき、年間に発見される穴ばこ件数は見直し前後で一定とし、点検頻度だけを変化させてリスクを試算することとした。以上の結果、図3-9に示すように、点検頻度を合理化することにより、各路線の穴ばこ滞留量をリスク管理水準範囲に収めることが可能となった。

さらに、図3-10は、以上の方法により、穴ばこ滞留リスクの適正化を図ることにより、路線網全体における穴ばこ滞留リスクと点検コストがどのように変化するかを試算した結果を示している。本ケースの場合は、点検の重点化を図り各路線のリスクの平準化を行うことにより、総リスクが減少し、総コストも縮減する結果となった[6]～[7]。

3.7 日常点検（路下）の評価

次に、日常点検（路下）において発見されたSランクの損傷件数と路下で発生した落下物等による事故、管理瑕疵の件数について分析し、路下損傷に関するリスクに基づいた管理水準の設定を行った。

都市高速道路管理者は、第三者に対する障害の防止を図ることを目的に日常的に路下点検を実施している。都市高速道路は、路下が一般道路となっている区間は多い。一般道路において管理瑕疵が非常に多いことから、路下が一般道路の区間に着目して路下損傷に関するリスクを整理することとする。

都市高速道路の路下の土地状況は、一般道路や事務所、駐車場、海等があり、これらの中には、路下

への影響が大きいと考えられる区域もある。例えば、一般道路、公園、駐車場（その他用地）等であり、実際に管理瑕疵も多く発生している。

路下の第三者への影響が考えられる路下条件として、図3-11、図3-12に示すように第三者影響区域を設定し、その延長の合計を「第三者影響区域延長」として定義した。

リスク適正化の基本的な流れは、穴ぼこ滞留リスクの場合と同じである。阪神高速道路株式会社ではインプットである日常点検（路下）頻度は路線や地区によって異なり、2005年度の実績は陸上部で6回/年、海上部で1回/年であった。アウトプット指標は、日常点検（路下）にて発見した緊急を要する損

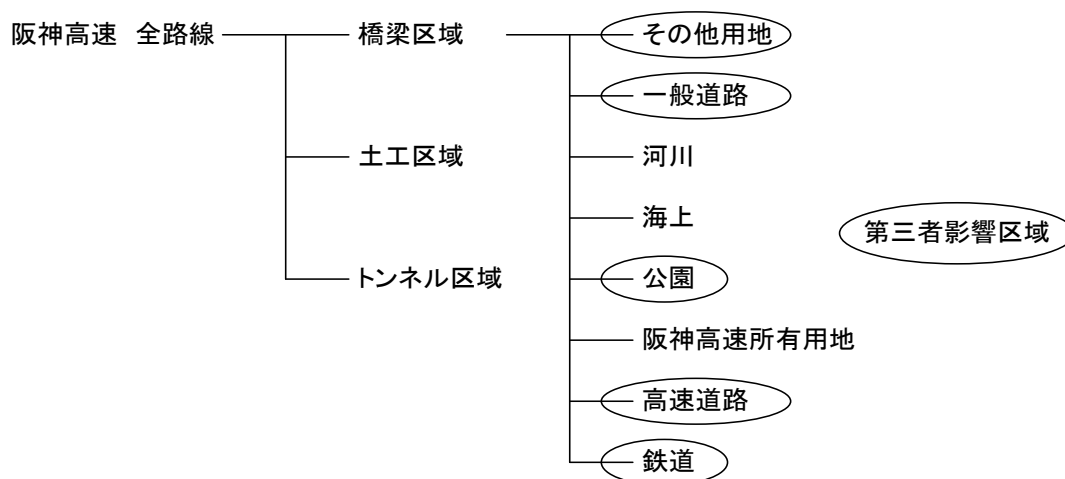


図3-11 第三者影響区域の定義

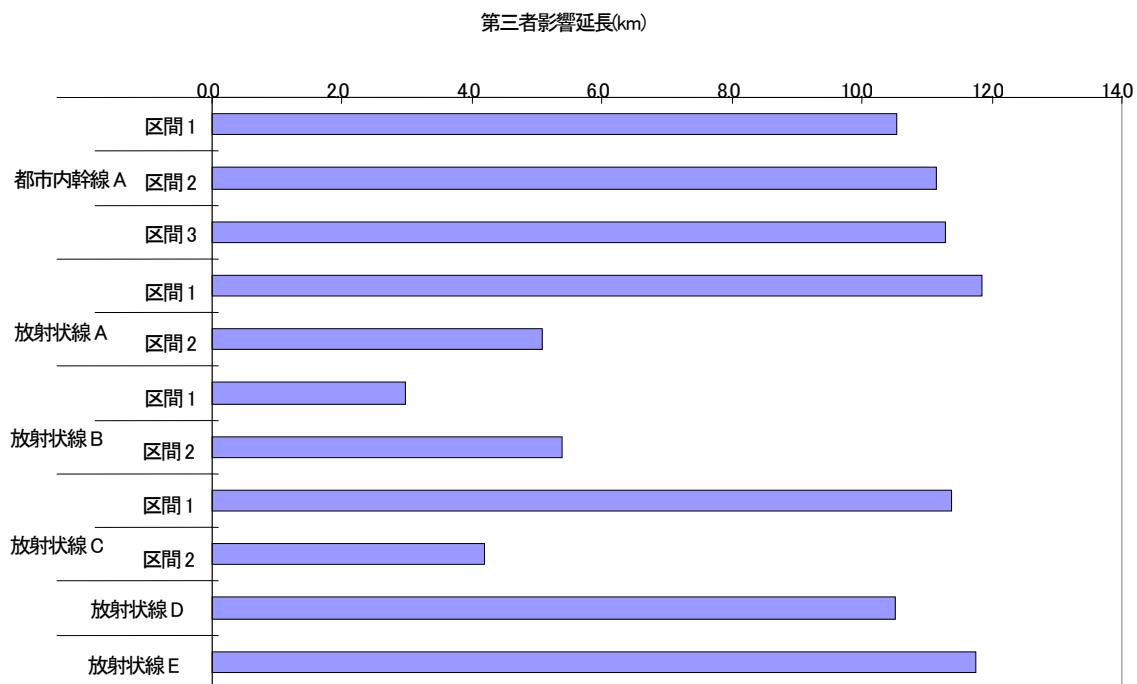


図3-12 第三者影響区域延長

傷件数を路線の点検頻度と高架部延長で除した路下損傷滞留量（件/回/km）とした。

路下損傷発生の要因を分析してみると、上下部工の竣工開始からの年数に比例して路下損傷の発見件数が増大することがわかった。特に1960年代後半に竣工された上下部工において損傷が発生していることがわかる（図3-13）。1つの路線においても、それを構成する区間によって竣工年代が異なる場合があるため、ここでは、各区間を単位として分析する。図3-14は、区間毎の路下損傷発見件数と管理瑕疵件数を示している。ここで、路下空間に対するリスク（路下損傷リスクと呼ぶ）を、

$$R_{ui} = P_{ui} \times C_{ui} \quad (3.7.8)$$

と定義する。ここで、 R_{ui} は路下損傷リスク、 P_{ui} は路下損傷滞留量、 C_{ui} は高架部延長である。路下損傷滞留量は、日常点検（路下）で1年間に発見された緊急対策を要する損傷件数を点検頻度および第三者に影響を与える区域の延長で正規化した指標であり、

$$P_{ui} = x_{ui} / f_{ui} / l_{ui} \quad (3.7.9)$$

と表される（図3-15）。ここで、 x_{ui} は年間路下損傷発見件数、 f_{ui} は年間日常点検（路下）頻度、 l_{ui} は第三者に影響を与える可能性がある区域の延長である。

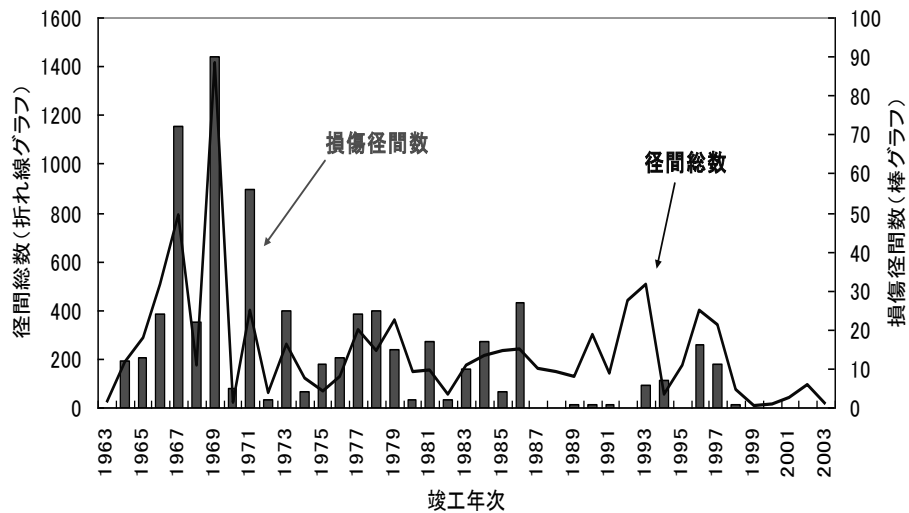


図3-13 竣工年代毎の路下損傷発見件数（坂井(2007)⁶⁾）

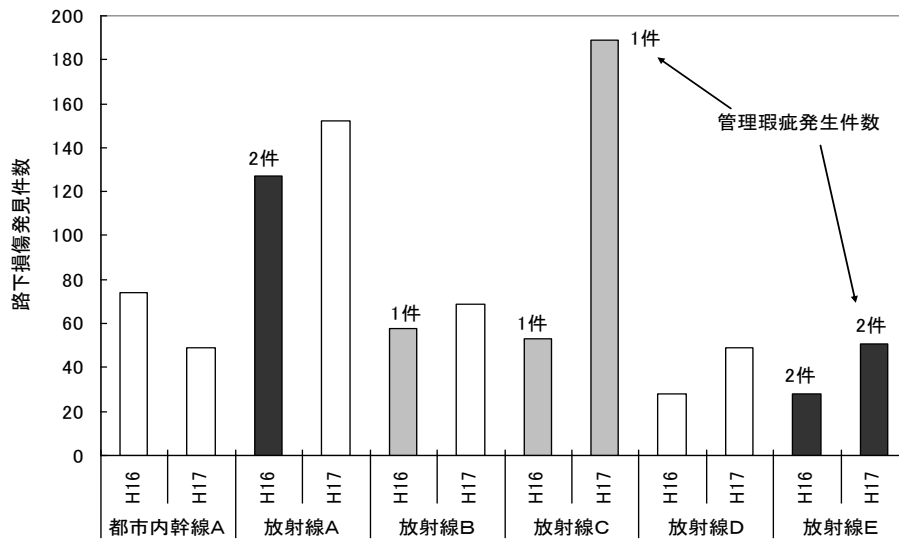
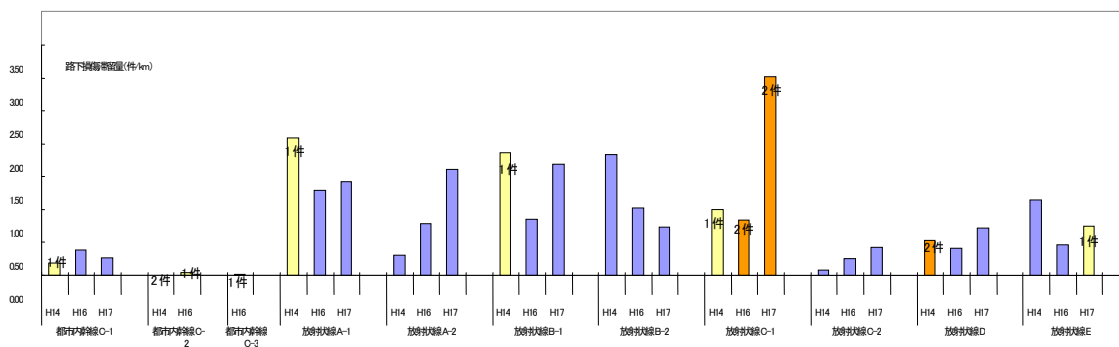
図3-14 路下損傷発見件数 (坂井(2007)⁶⁾)

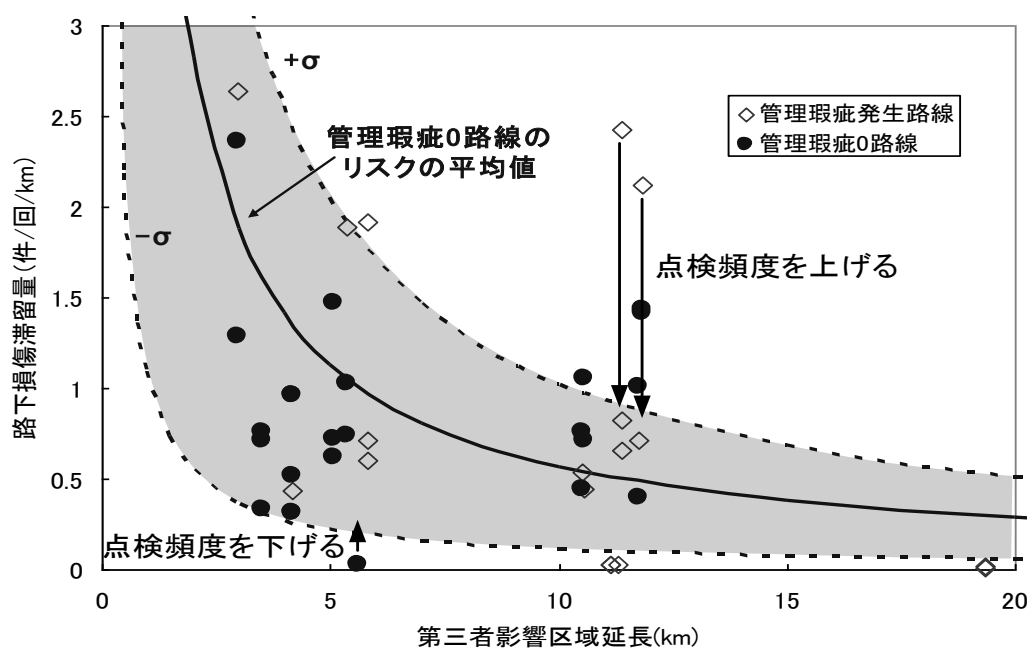
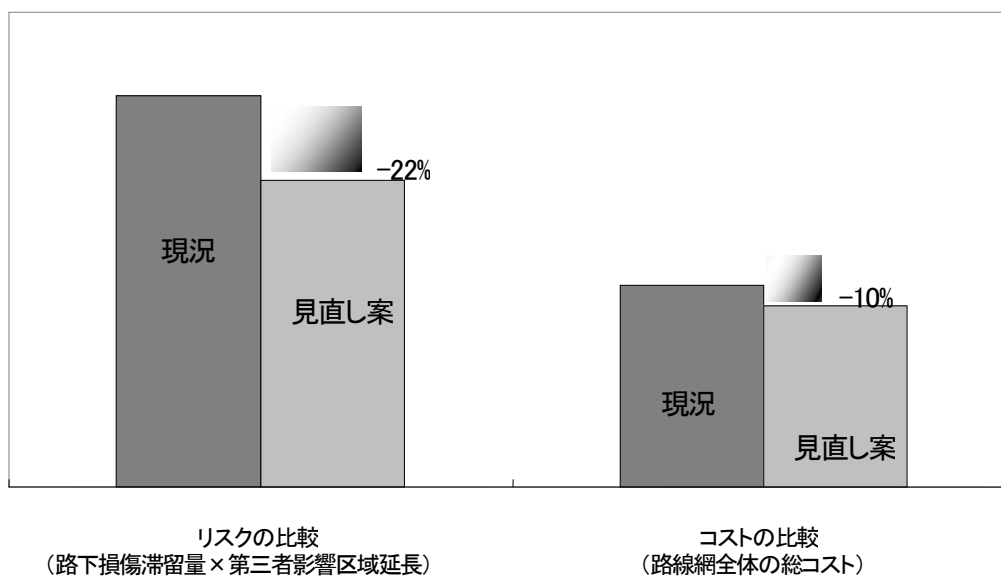
図3-15 路線毎・年度毎の路下損傷滞留量 (件/km)

路下損傷滞留に関する管理水準は、

$$R_{u,level} = \frac{\sum_i R_{u0i}}{n} \quad (3.7.10)$$

と設定した。ここで、 R_{u0i} は管理瑕疵件数がゼロであった路線の路下損傷リスク値とする。

点検頻度と路下損傷リスクの関係を分析することにより、路下損傷リスクが管理水準の範囲に収まるか否かを検討した (図3-16)。本ケースの場合は、このような路下損傷リスクの適正化を試みることにより、図3-17に示すように、路線網全体の路下損傷リスクが減少し、総コストも縮減する結果となった[6]。

図3-16 各区間の路下損傷リスク (坂井(2007)⁶⁾)図3-17 日常点検(路下)の見直しによるリスクとコストの縮減 (坂井(2007)⁶⁾)

3.8 結言

本章では、企業におけるリスクマネジメントと内部統制の必要性について述べるとともに、維持管理業務におけるリスクマネジメント手法について提案した。

さらに、第2章で構築したロジックモデルで定義づけした各指標のうち、リスク評価が可能な指標と

して、インプットとして日常点検（路上点検，路下点検）に着目し，リスクマネジメントを行った。その結果，路上点検において発見される穴ぼこ滞留量について，穴ぼこ滞留リスクの適正化，つまり，点検の重点化を図り各路線のリスクの平準化を行うことにより，総リスクが減少し，総コストも縮減する結果を得た。

また，路下点検についても，点検頻度と路下損傷リスクの関係を分析するとともに，路下損傷リスクが管理水準の範囲に収まるか否かを検討を行い，リスクの適正化を試みることにより，路線網全体の路下損傷リスクが減少し，総コストも縮減する結果となった。

現在，阪神高速道路株式会社においては，今回の結果を受け，PLAN-DO-CHECK-ACTION のうち，DO，つまり維持修繕レベルとして，各路線において試行を行っているところであり，道路を利用されるお客様への顧客満足度調査を年度毎に実施することにより，設定した管理水準の検証を行い，点検頻度の見直しを行っていくこととしている。

なお，評価指標については，本章において提案したように，リスク評価の観点から最適な管理水準について検討がされている指標もあるが，本体構造物を含め，最適化がなされていない指標も存在する。

今後重要なのは，個々の評価指標を最適化していくことが必要といえよう。

参考文献

- [1] W.K.Kellogg Foundation: W.K.Kellogg Foundation Evaluation Handbook, 1998.
- [2] 財農林水産奨励会・農林水産政策情報センター：ロジックモデル策定ガイド，2003.8
- [3] 坂井康人，西林素彦，荒川貴之，小島大祐，小林潔司：高速道路の効果的な維持管理を目的としたロジックモデル（HELM）の検討，第62回土木学会年次学術講演会，2007.
- [4] リスク管理・内部統制に関する研究会：リスク新時代の内部統制，2003.6
- [5] 坂井康人，上塚晴彦，小林潔司：ロジックモデル（HELM）に基づく高速道路維持管理業務のリスクマネジメント，第27回日本道路会議，2007.
- [6] 坂井康人，上塚晴彦，小林潔司：ロジックモデル（HELM）に基づく高速道路維持管理業務のリスク適正化，建設マネジメント研究論文集，土木学会，Vol.14，pp.125-134，2007.
- [7] Yasuhito SAKAI, Kiyoshi KOBAYASHI, Haruhiko UETSUKA：Risk Evaluation and Management for Road Maintenance on Urban Expressway Based on HELM (Hanshin Expressway Logic Model)，The Fourth International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management，pp.574-581，2008.
- [8] Yasuhito SAKAI, Kiyoshi KOBAYASHI, Haruhiko UETSUKA：New Approach for Efficient Road Maintenance on Urban Expressway Based on HELM (Hanshin Expressway Logic Model)，Society for Social Management Systems 2008，pp.1/11-pp.11/11，2008.
- [9] 中林正司，西岡敬治，小林潔司；阪神高速道路の維持管理の現状と課題：土木学会論文集 vol.6, No.4, pp.494-505，2007.
- [10] Yasuhito Sakai：Practical Asset Management System of Hanshin Expressway-Logic Model and BMS, 2nd International Workshop on Lifetime Engineering of Civil Infrastructure，pp.239-255，2007.

第4章

ブリッジマネジメントシステムを用いた管理手法

4.1 緒言

第3章では第2章において構築した維持管理ロジックモデルに基づき、設定した管理水準のうち日常点検（路上点検，路下点検）を対象に、リスクマネジメントによる管理について点検頻度の平準化による考察を行った。本章では舗装並びに本体構造物に着目した劣化モデルについて検討を行うとともに、H-BMS を用いてベンチマーク評価を行う指標である舗装保全率，構造物舗装保全率を向上させるべくPDCA サイクルも含めたマネジメント手法について述べるものとする。

舗装保全率は、第2章において定義したとおり、路面のわだち掘れやひび割れによる不快感少なくお客様が快適に感じる舗装の状態の割合を表す指標であり、路線毎，交通量毎等に区分した単位毎に，計測，評価する。また，構造物保全率は，構造物の各部材を適切に補修できているかを表した指標(%)であり，以下の式により算出され，舗装保全率と同様，路線毎，交通量毎等に区分した単位毎に計測，評価する。これら指標についてはブリッジマネジメントシステムを活用し，中長期的に最適な補修計画の策定を行うことにより，定量評価を行うものである。

橋梁のアセットマネジメントでは，ライフサイクル費用の低減化が図れるような最適補修戦略を求めることが重要な課題である。その上で，将来時点における橋梁の補修需要を予測し，橋梁の維持補修のために要する予測計画を策定することが必要となる。橋梁の劣化予測モデルは，LCC や補修需要を予測するために重要な役割を果たす。

橋梁部材の劣化予測モデルとして，1) 過去の目視点検結果に基づいた統計的な劣化予測モデル，2) 力学的メカニズムに基づいた劣化予測モデルが提案されている。対象となる問題によっていずれの劣化予測モデルを用いるべきかが決定される。例えば，橋梁群全体としてのマネジメント戦略や予算管理を検討する場合，統計的予測モデルが有効である。本章では，都市高速道路におけるアセットマネジメントシステムとして，阪神高速のブリッジマネジメントシステムである H-BMS[1]–[4]に搭載する劣化予測手法について検討を行うとともに，H-BMS を用いた方法論について提案する。

4.2 都市高速道路における橋梁マネジメントシステム

近年、橋梁の健全度判定や診断の結果から、劣化過程をモデル化し、限られた予算内でライフサイクル費用を最小にすることができるような補修、補強工法や優先順位を決定するためのBMSが構築されている[5]–[9]。BMSでは、橋梁部材の劣化予測が重要となるが、橋梁部材の統計的劣化予測モデルとしてマルコフ連鎖モデルがある。マルコフ連鎖モデルでは、橋梁部材の健全度が複数のレーティングにより表現され、橋梁部材の劣化による健全度間の時間的推移過程をマルコフ推移確率を用いて表現する。マルコフ連鎖モデルは操作性が高く、米国の標準的な橋梁マネジメントシステムの1つであるPONTIS等をはじめとして、多くの橋梁マネジメントにおける劣化予測モデルとして用いられており、土木構造物の最適補修戦略を求める方法も数多く提案されている[10]–[12]。

また、BMSではライフサイクル費用を評価することが必要となるが、ライフサイクル費用評価法として、1) ライフサイクル費用の割引現在価値を評価する割引現在価値法、2) 割引率を用いずにライフサイクル費用を直接評価する非割引現在価値法がある[13]。割引現在価値法は、既往の最適補修モデルや米国の代表的なBMSであるPONTIS[14]においても採用されている。ここでは、都市高速道路である阪神高速道路株式会社を例として、H-BMSを用いた合理的、効率的な維持管理計画を立案するため方法論について提案する。

H-BMSは、阪神高速道路株式会社がこれまでに蓄積してきた豊富な点検データに基づいて、多段階指数ハザードモデル[15]を用いてマルコフ推移確率を推計することにより、現実の劣化過程に関する情報を劣化予測に反映させることを可能とした。

さらに、多段階指数ハザードモデルを用いることにより、構造種別、路線別の劣化曲線を推計することが可能である。ライフサイクル費用評価にあたっては、割引現在価値法を用いている。また、年度毎の予算制約を考慮して、構造物の補修、劣化過程をシミュレートするメカニズムを有している。

H-BMSは、1) 構造物を適切な水準に長期的に維持するために必要な費用の算出、2) 長期的な機能水準や費用の推移、補修の優先順位等を算出し、維持管理計画を立案するための参考資料の提供、3) 適切な補修計画および補修費用の根拠を明確にし、説明責任を果たすこと等を目的としている。

阪神高速道路株式会社では、土木構造物を対象に点検要領[16]を策定しており、本要領に準じて定期的に舗装（路面）状態を点検している。近年では点検車両によって2～3年毎に路面のわだち掘れ量、ひび割れ密度、縦断凸凹量を自動計測しており、計測された点検記録は舗装の管理単位である径間毎、車線毎に阪神高速道路株式会社が公団時代から所有、運用しているデータベースシステムである保全情報管理システム（構造物の資産、点検、補修に関するデータベースシステム[17]）に蓄積している。

H-BMSでは保全情報管理システムに蓄積されたデータを用いて、構造物の状態把握および劣化予測を行い、機能を継続的に維持するための維持修繕費の必要額と維持補修の優先順位を算出し、予算計画、

補修計画を立案する。さらに、実際に実施した維持補修の事後評価、資産情報の更新を行なうことにより、維持補修方針のレビューおよび見直しを行うものである。H-BMSを活用した維持管理手順は図4-1に示すように模式化できる[18]。

H-BMSは、構造物の劣化に対する維持管理計画の立案を目的としており、図4-2、図4-3に示すように、舗装、塗装、伸縮継手、床版、鋼構造物、コンクリート構造物、支承を対象工種(部位)としてとりあげ、これらの工種毎に維持管理計画の策定を可能とした。

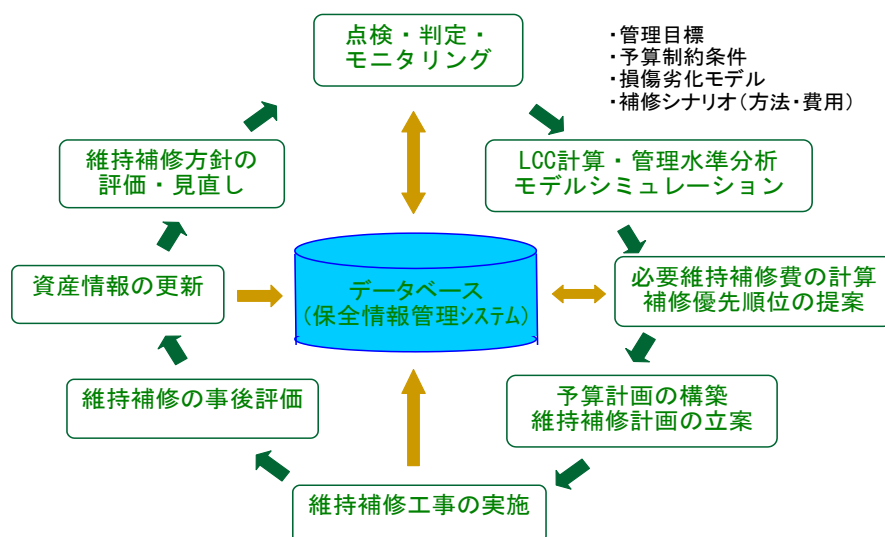


図4-1 H-BMSを用いた維持管理手順(中林(2007)⁴⁾)

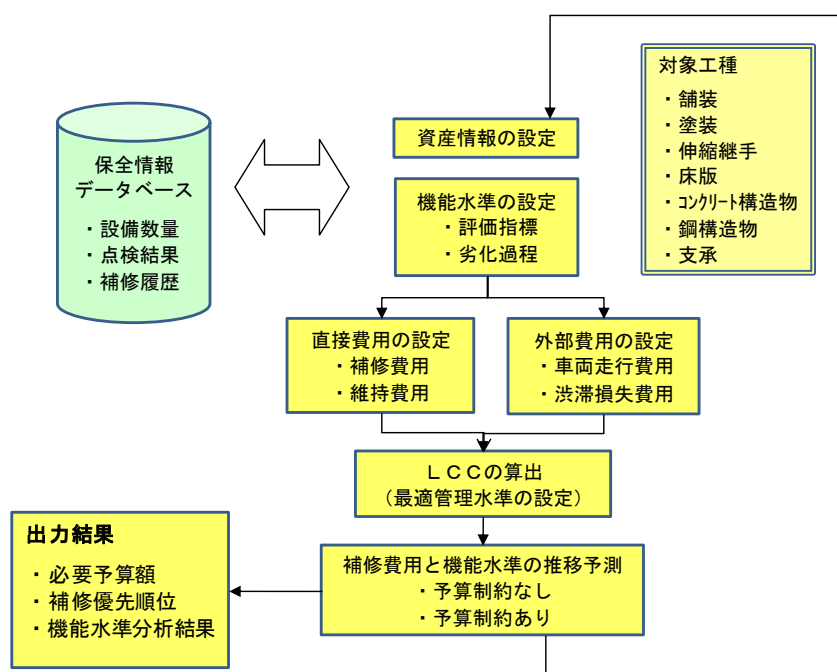
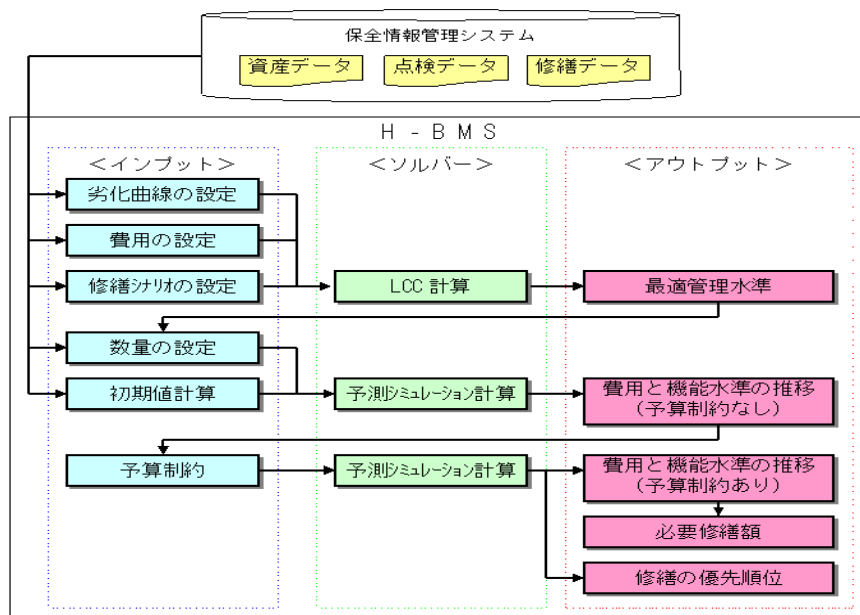


図4-2 H-BMSの構成および計算手順

図4-3 H-BMS の計算手順 (坂井(2008)¹⁷⁾)

4.3 舗装の最適補修計画の検討

4.3.1 劣化モデルの推定方法

舗装の修繕は、利用者費用や社会費用を含めたライフサイクル費用が最小になるようなタイミングで実施されることが望ましい。しかし、道路管理者は道路舗装の最適な修繕計画を達成できる予算を毎年確保できるとは限らず、当該年度の限られた修繕予算の中で、優先順位の高い道路区間に限って修繕を実施せざるを得ない場合が少なくない。当該年度に修繕されなかった箇所に関しては、その修繕が翌年度以降に先送りされることになる。

既存の道路舗装の老朽化や道路資産の増大を背景として、今後、道路舗装の修繕需要は劇的に増加することが予想される。財政基盤の縮小が予想される中で、新規道路整備の投資余力を残しながら、舗装の効率的な修繕を実施するための予算管理が重要となる。

舗装マネジメントは、舗装の機能を維持するために十分な修繕が継続的に実施されているかを評価し、適切なサービス水準を持続的に維持していくことが重要であり、修繕の必要な候補区間を抽出し、修繕の実施の優先順位を付け、限られた修繕予算の制約の中で効率的に修繕箇所の選択を行うことを目的としている。

阪神高速道路株式会社では、自動計測車を用いて舗装状態を表すデータとして径間、車線毎のひび割れ率、平均わだち掘れ量、縦断凹凸量等を収集している。そこで、舗装の健全度指標としては、以下に示す式から計算されるMCI (Maintenance Control Index) 値を用いている。MCI値は旧建設省が提案した道路舗装のサービス水準を示す指標であり、舗装のひび割れ率、わだち掘れ量、平坦性から算出される[19]。

$$MCI = 10 - 1.51C^{0.3} - 0.3D^{0.7} \quad (4.3.1)$$

ここに、 C はひびわれ率(%), D は わだち掘れ量(mm)を表す. この際, 出来形管理における不陸の許容値を勘案し, 舗装補修時には, ひびわれ率0%, わだち掘れ量2.0mmとしてMCI=9.5に戻ると設定している.

阪神高速道路株式会社では, 蓄積された舗装劣化過程に関するデータを用いて統計的劣化モデルを作成するとともに, 劣化モデルにより将来の舗装の劣化予測を試みている. 劣化過程には不確実性が存在することより, 劣化過程をマルコフ推移確率を用いて表現している. 点検間隔の異なる複数の時点のデータが混在する状況でも精度よくマルコフ推移確率を推定できるように, 多段階指数ハザードモデル[15]を用いてマルコフ推移確率を推定している. すなわち, 点検データに基づいて多段階指数ハザードモデルのパラメータを最尤推定法により推計し, その結果に基づいてマルコフ推移確率行列を解析的に導出する. さらに, マルコフ推移確率行列を用いて, 平均的な劣化曲線を推定している.

その結果, 舗装の健全度に応じて劣化速度が変化する状況を再現することができ, 理論的な考え方との整合性を取りやすくなる. さらに, 劣化進展のメカニズムが異なる区間や路線毎にマルコフ推移確率行列を推定できるため, 劣化曲線をきめ細かに設定することが可能になった.

多段階指数ハザードモデルの推計にあたっては, 青木らは, 健全度が幾つかのグレードで評価される場合における健全度の低下を(4.3.2)のワイブルハザード関数で定義し, 変数を点検結果から最尤推計する手法を開発している[15].

ここで, $\lambda_i(y_i)$ はハザード関数であり, 健全度 i から $i+1$ に推移するときの確率密度を示している. θ は i に固有の定数パラメータ, α_i は劣化の加速度パラメータであり, $0 < \alpha_i < 1$ なら時間の経過と共に劣化の進行が遅くなり, $\alpha_i = 1$ なら時間の経過に関わらずに一定, $1 < \alpha_i$ なら時間の経過に伴って加速度的に劣化が進行する現象を表している. このように, ワイブルハザード関数では, 時間の経過に伴う劣化速度の変化を表現することができる.

$$\lambda_i(y_i) = \theta_i \alpha_i y_i^{\alpha_i - 1} \quad (4.3.2)$$

一方, H-BMS のうち舗装における劣化曲線の推計では, (4.3.2) の α_i を 1 とした(4.3.3)式の指数関数をハザード関数として用いている.

点検結果から(4.3.3)の θ を推計し, この期待値パスを劣化曲線として採用している. (4.3.3) のように, ハザード関数を指数関数とすることで, 推計する変数が θ のみとなり, 推計が容易となる. H-BMS の劣化曲線の推計を(4.3.2)のワイブル関数ではなく, (4.3.3)の健全度別のハザード率が時間に依存しない指数関数としているのは, (4.3.2) では θ と α_i の2種類の変数を推計することになり, 技術的な困難が伴うためである.

$$\lambda_i(y_i) = \theta_i \quad (4.3.3)$$

但し、 i は部材の健全度、 λ_i はハザード関数、 y_i は時間軸上の時点、 θ_i は定数（未知パラメータ）である。マルコフ推移確率を用いる場合、健全度を離散値として表現することが必要となる。舗装の場合、連続値であるMCI値をデータの存在する $5.0 < \text{MCI} \leq 10.0$ の範囲で1.0刻みに分類し、その中央値を健全度の代表値とした。

多段階指数ハザードモデルを用いた場合、マルコフ推移確率は劣化の進展度合いに応じて、以下のよう表現される。

- 1) 健全度の推移がない場合

$$\pi_{ii} = \exp(-\theta_i Z) \quad (4.4.4)$$

- 2) 1ランク健全度が推移する場合

$$\pi_{ii+1} = \frac{\theta_i}{\theta_i - \theta_{i+1}} \{-\exp(-\theta_i Z) + \exp(-\theta_{i+1} Z)\} \quad (4.4.5)$$

- 3) 2ランク以上健全度が推移する場合

$$\pi_{ij} = \sum_{k=i}^j \prod_{m=i}^{k-1} \frac{\theta_m}{\theta_m - \theta_k} \prod_{m=k}^{j-1} \frac{\theta_m}{\theta_{m+1} - \theta_k} \exp(-\theta_k Z) \quad (j=1, \dots, J) \quad (4.4.6)$$

- 4) 最低ランクに健全度が推移する場合

$$\pi_{iJ} = 1 - \sum_{j=i}^{J-1} \pi_{ij} \quad (i=1, \dots, J-1) \quad (4.4.7)$$

ここに、 Z は点検間隔、 i は推移前の健全度、 j ($j \geq i+1$)は推移後の健全度である。ハザード関数の θ_i を最尤推定法により推計すれば、(4.3.4) ～ (4.3.7) を用いてマルコフ推移確率行列

$$\Pi(Z) = \begin{bmatrix} \pi_{11}(Z) & \cdots & \pi_{1J}(Z) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \pi_{JJ}(Z) \end{bmatrix} \quad (4.3.8)$$

を推定することができる。

ハザード関数によって劣化の推移をモデル化していることから、劣化が次のランクに進むまでの期待期間長（RMD）は

$$\text{RMD}_i = \int_0^\infty \exp(-\theta_i y_i) dy_i = \frac{1}{\theta_i} \quad (4.3.9)$$

と表される。(4.3.9)を用いて、平均的な劣化過程を求めることができる。

以上のプロセスにより、劣化推移の傾向を支配する因子毎にデータをグループ分けし、劣化曲線を作成する。舗装の場合、床版種別、路線別（交通特性、線形等の違い）による劣化の進展を表す劣化曲線を設定している。

図4-4には以上に述べた方法により得られた床版種別毎の舗装の劣化曲線を示す。図4-4より、土工部において舗装の劣化速度が速いことが理解できる。

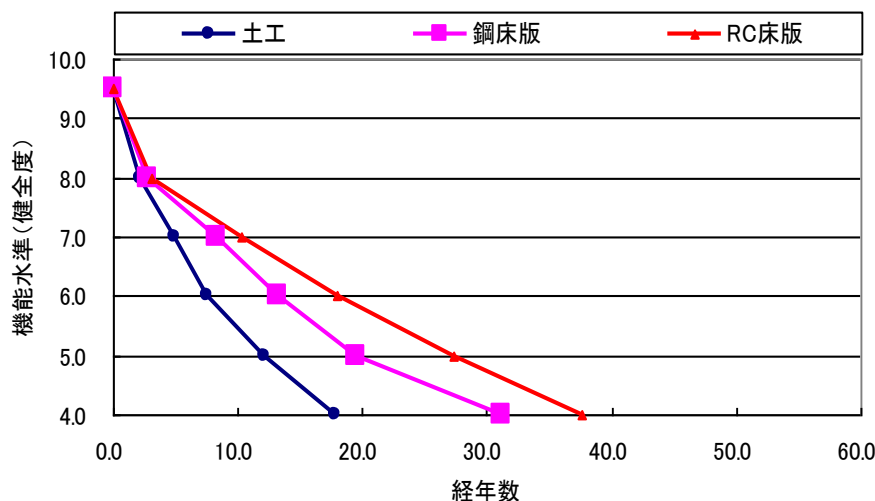


図4-4 舗装の劣化曲線 (坂井(2008)¹⁷⁾)

4.3.2 最適管理水準の設定

過去のMCI点検記録に基づいて舗装の劣化過程を予測することが理論的には可能である。既存の点検データは年度により観測地点が異なっており、劣化過程を十分な精度で推計できるほどのデータは整備されていない。このため、劣化過程を簡単な劣化モデルで記述せざるを得ない。今、ある道路区間において年度 t における点検において観測されたMCI値を $z(t)$ と表そう。年度 $t + \tau$ におけるMCI値の推計値が、

$$z(t + \tau) = z(t) - \psi\tau \quad (4.3.10)$$

と表現されると考える。ここに、 ψ は当該の道路区間における1年間当たりのMCIの平均低下量である。MCI値は道路舗装の劣化水準を示す指標であり、理想的な状態を10.0とし、舗装の劣化が進展するほど、その値は小さくなる。MCI値がある臨界的な水準（本研究では最適管理水準と呼ぶ）に到達した時点で修繕を実施することにより、LCCの最小化が達成できる。今、初期時点 $t=0$ で舗装が修繕され、MCI値が回復水準 Z まで回復したとしよう。さらに、初期年度より θ 年が経過し舗装のMCI値が $z(\theta) = z^o$ に到達した年度で再び修繕を実施するルールを考えよう。修繕直前のMCI値が z^o であり、その時の修繕費を $F(z^o)$ 、修繕時の交通規制で発生する渋滞損失用を c_f と表そう。

この時、初期時点の MCI 値 Z の下で達成される LCC を $J(Z; z^o)$ と定義すれば、LCC は再帰的な性質を利用して、

$$J(Z; z^o) = \sum_{t=0}^{\theta(z^o)} \frac{c(z(t))\beta + d(z(t))}{(1+\alpha)^t} + \frac{J(Z; z^o)}{(1+\alpha)^{\theta(z^o)}} \quad (4.3.11)$$

と表せる。ただし、 $c(z(t))$ は MCI 値が $z(t)$ の時の利用者費用、 β は年平均交通量、ポットホール補修等、日常的に発生する維持費用を $d(z(t))$ 、 $\theta(z^o)$ は当該年度より最初の修繕が実施される年度までの時間間隔（年）である。すなわち、右辺第1項は次回の修繕時点までに発生する総利用者費用の現在価値、第2項は次の時点における修繕費の現在価値、および第3項は次回に修繕以降において最適に修繕を実施することにより発生するライフサイクル費用の現在価値を表す。

上式を項 $J(Z; z^o)$ に関して整理すれば、

$$J(Z; z^o) = \left\{ 1 - \frac{1}{(1+\alpha)^{\theta(z^o)}} \right\}^{-1} \times \left\{ \sum_{t=0}^{\theta(z^o)} \frac{c(z(t))\beta}{(1+\alpha)^t} + \frac{F(z^o)}{(1+\alpha)^{\theta(z^o)}} \right\} \quad (4.3.12)$$

を得る。(4.3.12)において、LCC は修繕を実施する時点の MCI 値 z^o に応じて変化する。1次元探索法を用いれば、 $J(Z; z^o)$ を最小とするような最適管理水準 z^o を求めることができる。

このような LCC を最小にするような z^o を、本研究では「最適管理水準」と定義することとし、以下 z^* と表すことにする。さらに、現時点 $t=0$ において観測した MCI 値が z であり、それ以降に最適管理水準 z^* に基づいて最適なタイミングで舗装の修繕を実施した場合に達成される LCC は、

$$J(z; z^*) = \sum_{t=0}^{\hat{\theta}(z^*, z)} \frac{c(z(t))\beta}{(1+\alpha)^t} + \frac{F(z^*)}{(1+\alpha)^{\hat{\theta}(z^*, z)}} + \frac{J(Z; z^*)}{(1+\alpha)^{\hat{\theta}(z^*, z)}} \quad (4.3.13)$$

と表せる。ただし、 $\hat{\theta}(z^*, z)$ は MCI 値 z が観測された当該年度から MCI 値が管理水準 z^* に到達するまでの平均経過年数を表す。

H-BMSでは、構造物の機能を継続的に維持するために必要な費用をLCCにより評価する。LCCは、会社が支出する直接費用と利用者が負担する外部費用の和として、

$$\text{LCC} = \text{直接費用（修繕費用、維持費用）} + \text{外部費用（車両走行費用、渋滞損失費用）}$$

と表され、LCC を構成する各費用項目は以下のように定義する。

修繕費用：過去における補修工事实績を踏まえ、工事に伴う工事費用に、交通規制に伴う規制費用を加えた費用。

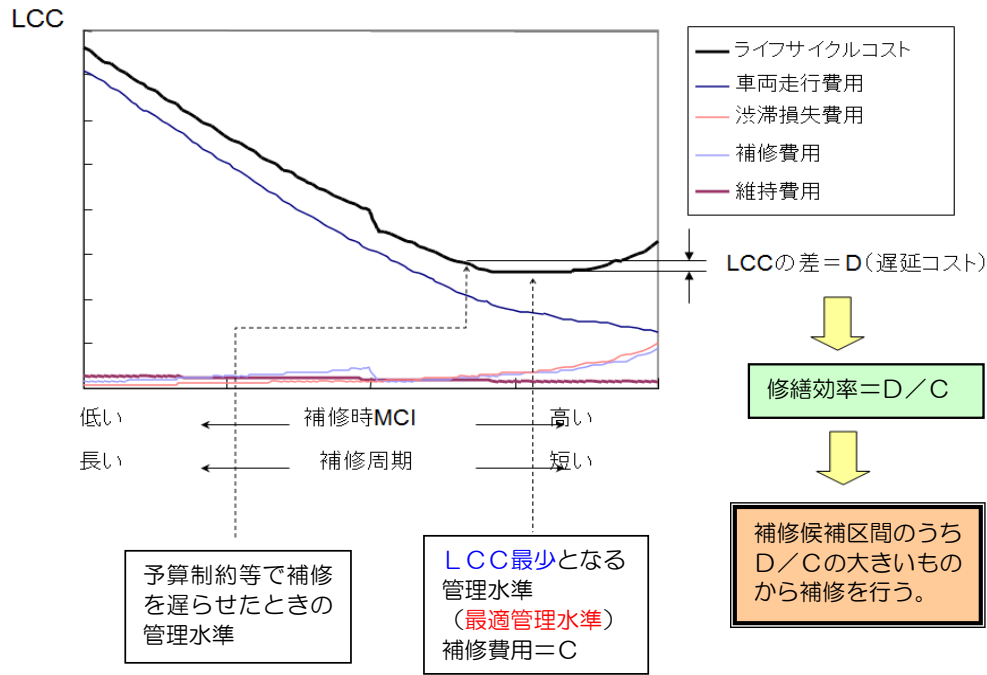
維持費用：舗装の劣化に伴い、突発的なポットホール補修や段差修正等の日常的な維持費用であり旧建設省が一般国道を対象に行った調査結果[19]をデフレータ補正した値を用いた。
(MCIに応じて設定)

車両走行費用：車両の走行に伴う燃費や車体の減価償却等、MCIの低下に応じて利用者が余分に負担する費用。なお、車両走行費用は、旧建設省において実施されたMCI値と車両走行費用の関係を定量的に調査した事例[20]を参考に設定した。車両走行費用で考慮されている費用は、燃費、車両の維持費、減価償却費の3つである。

渋滞損失費用：工事規制に伴う渋滞に対して発生する利用者の損失費用。

なお、上記のうち渋滞損失費用については、区間毎の渋滞状況と時間ロスをできるだけ忠実に表現するために、阪神高速道路株式会社で開発されている交通管制システムの交通流シミュレーションモデル[21]を用いて、所要時間の変化や渋滞状況を把握し算出された損失時間に時間評価値（原単位）を乗じることによって算出した。ここで、渋滞損失費用を算出するための原単位は、2003年度の経済統計より国民総所得を就業者数で割った1人当たりの所得を年間労働時間で割った時間評価値に、阪神高速道路の平均乗車率1.4人を掛けた76.7円/台・分とした。

さらに、補修ルールとしてMCI値がある水準（管理水準と呼ぶ）に到達した時点で、舗装の補修を実施すると考えよう。この時、所与の管理水準に対して、その際に必要となるLCCを算定することができる。図4-5は、管理水準とLCCの関係を図示したものである。LCCが最小となるようなMCIを最適管理水準と呼ぼう。また、舗装のMCI値が最適管理水準に至るようなタイミングが最適補修時期となる。

図4-5 最適管理水準と優先順位の決定方法（中林(2007)⁴⁾

4.3.3 補修優先順位の決定

舗装の補修予算に制約がない場合、各路線、あるいは区間の中で、MCI値が、最適管理水準に達した箇所（路線）を年度毎に補修することにより、LCCの最小化を達成することができる。しかし、実際には予算制約があるため各予算年度において補修を実施する区間の優先順位を決定する必要がある。

ある区間の修繕工事の便益を、「当該時点で修繕をせずに1年間放置し、翌年度に修繕を行った場合LCC」と「MCI管理水準を用いて最適に修繕を行った場合に得られるLCC」の差として定義しよう。

LCCの増加分は負の便益と考えることができるため、これを遅延コスト（D）として表そう。舗装の修繕を1年間放置した場合のLCCを $\tilde{J}(z)$ 、MCI管理水準を用いて最適なタイミング年度に修繕した場合のLCCを $J(z; z^*)$ と表記すれば、修繕工事の便益は $\tilde{J}(z) - J(z; z^*)$ と定義できる。

ただし、LCCの算定にあたっては、次回以降の修繕をすべてMCI管理水準 z^* を用いて実施すると仮定している。この時、当該年度 t における舗装の修繕工事の費用便益比 (D/C) は、

$$(D/C) = \frac{\tilde{J}(z) - J(z; z^*)}{F(z)}$$

$$\tilde{J}(z) = c(z)\beta + \frac{F(z(t+1))}{(1+\alpha)} + \frac{J(z; z^*)}{(1+\alpha)} \quad (4.3.14)$$

$$J(z; z^*) = \left\{ 1 - \frac{1}{(1+\alpha)^{\theta(z^*, z)}} \right\}^{-1} \times \left\{ \sum_{t=0}^{\theta(z^*, z)} \frac{c(z(t))\beta}{(1+\alpha)^t} + \frac{F(z^*)}{(1+\alpha)^{\theta(z^*, z)}} \right\}$$

と表せる。以上で定式化した費用便益比を用いれば、予算制約の下で修繕順序を求める実用的な手順を以下のようにとりまとめることができる。すなわち、

- 1) 修繕を行うべき最低 MCI 水準 $\underline{Z}$ を設定する。
- 2) $\underline{Z}$ に到達している区間を最も優先順位の高い区間として抽出する。
- 3) 全ての道路区間に対して費用便益比 (D/C) を算定し、費用便益比 (D/C) > 1 となる区間の中で (D/C) が最も大きい区間を選択する。
- 4) 以上より決定した優先順位に基づいて、予算制約の範囲内で修繕を行う区間を決定する。

以上の方法で、予算制約がある場合における舗装の望ましい修繕順序を近似的に求めることができる [22]–[23]。図 4-6 は、今後 100 年間を対象として、道路ネットワーク上のある 1 区間における管理水準と LCC との関係性を計算した結果を示している。この図から、この区間では MCI=6.3 で補修することにより、LCC の最小化が達成できることが理解できる。

H-BMS は外生的にシナリオとして与えた予算制約のもとで、前述の優先順位に基づいて、各年度における補修箇所を選定し、補修を実施する過程をシミュレーションする機能を搭載している。

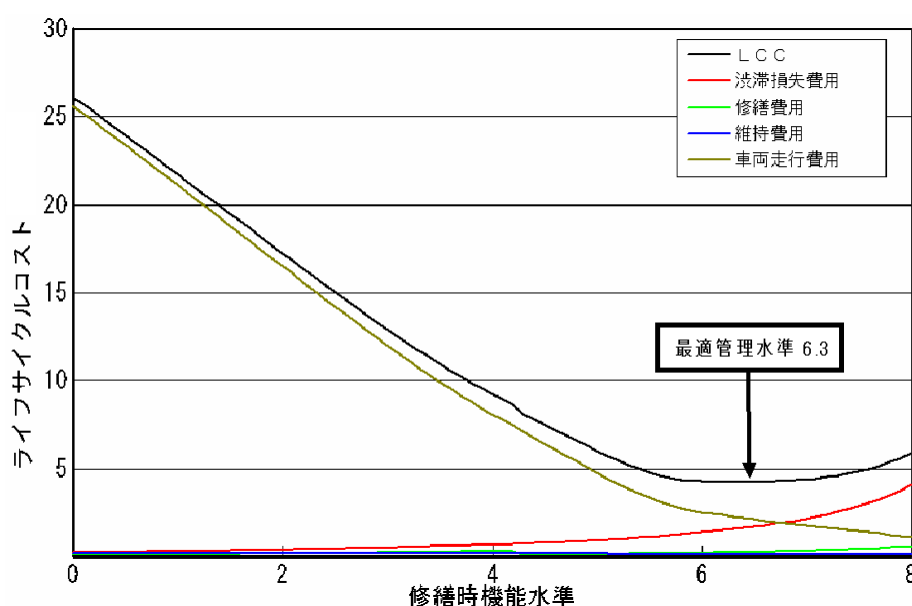


図 4-6 最適管理水準 (中林(2007)⁴⁾)

図 4-7 は、補修予算の制約を行ったケースのシミュレーションを実施した場合に、検討区間において発生する直接費用の時間的な変化状態を予測した結果を表している。

このうち、(a) は修繕費の予算制約を A 億円/年、(b) は $A + \alpha$ 億円/年 (最適管理水準を維持するのに要する費用) に設定した場合の計算結果を示したものである。(a) 図では修繕費用の不足により、最適な補修タイミングを越え、状態の悪い舗装が状態の悪い舗装が存置される。

そのため、それらの対応に必要な維持費用が 2005 年から増加し、およそ 20 年後には維持費用も予算限

度額に達している。一方、(b) では過去からの積み残しを順次消化することが可能であり、今から35年後には毎年予算限度額の中で、最適管理水準に基づいた補修を実行することが可能となる。さらに、100年間の維持費と修繕費を合計したトータルコストも11%程度縮減できる。

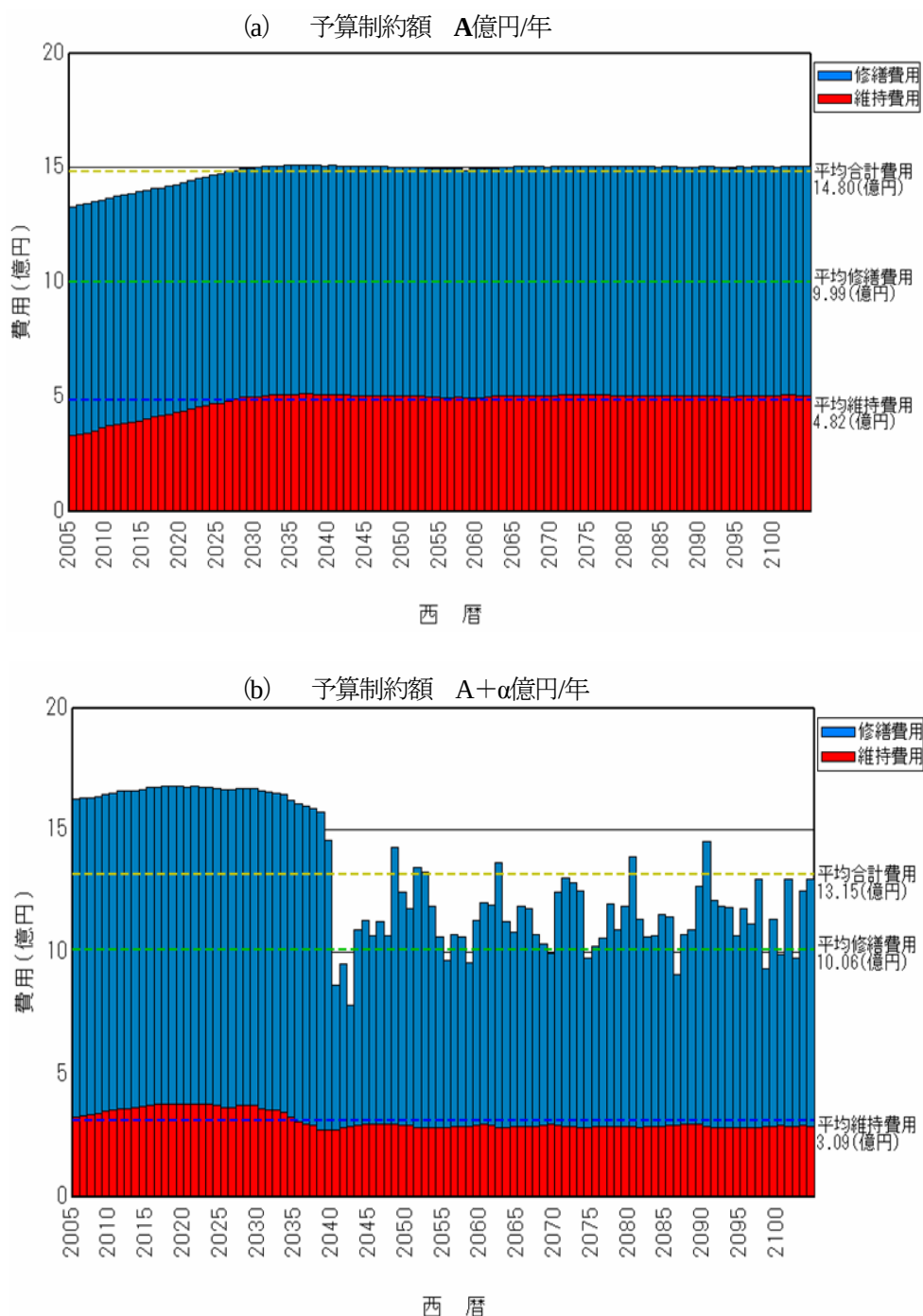
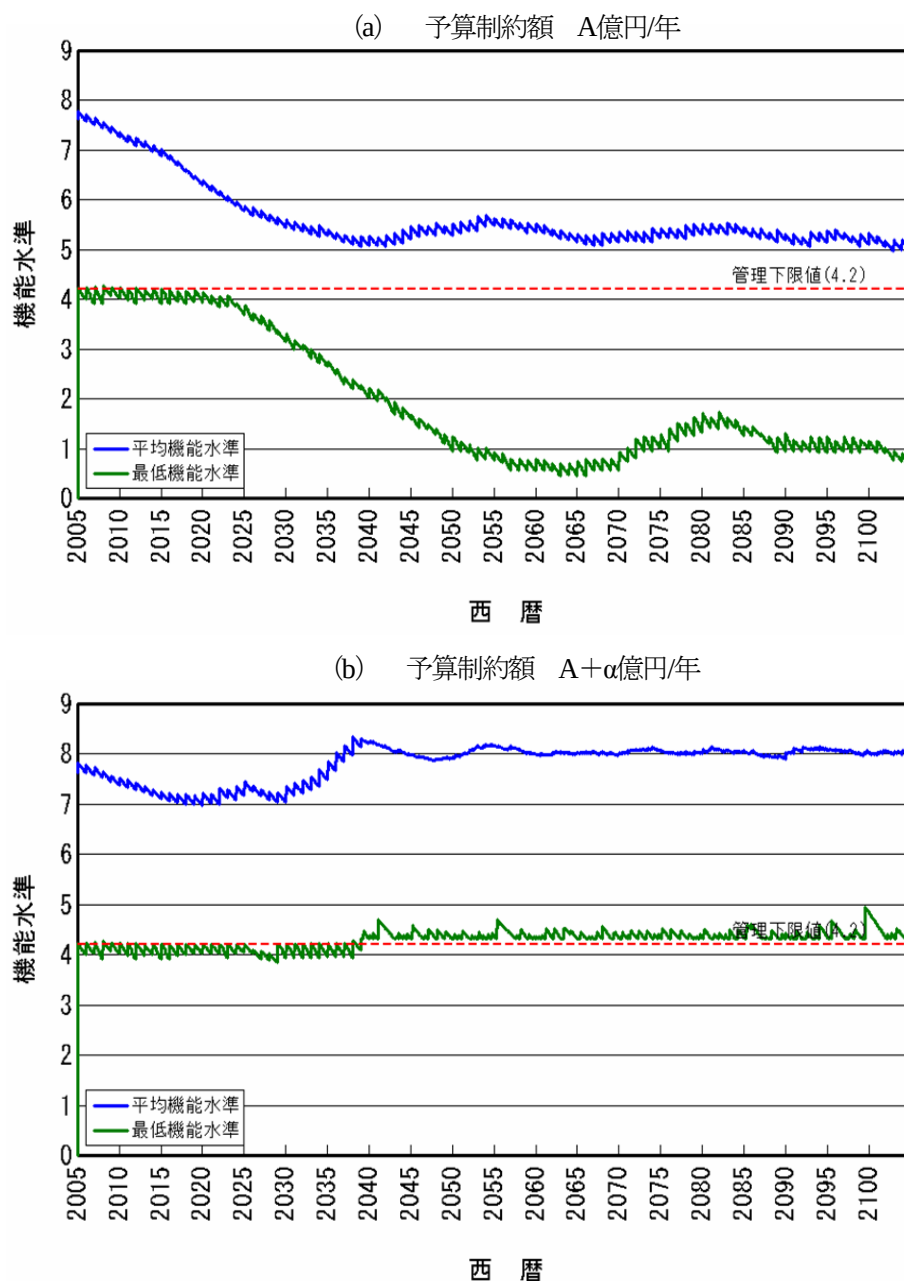


図4-7 維持管理費用の推移 (中林(2007)⁴⁾)

図4-8は、検討区間における平均的なMCI水準と、当該区間の中で最低のMCI水準を求め、その時間的な変化状態を求めた結果である。同図における (a), (b) は、図4-7の (a), (b) に対応している。(a) では、今後継続的にMCIの平均水準が低下していく。その間、補修の積み残しが蓄積していく

図4-8 機能水準の推移 (中林(2007)⁴⁾)

ため、約20年後から最低機能水準が低下していく。その結果、管理水準が、阪神高速道路株式会社が設定する管理下限値を下回ることになる。なお、管理下限値とは、表4-1に示すように舗装のひび割れ、わだち掘れ量とともに阪神高速道路株式会社が設定する判定基準であるAランク、つまり、MCI値で言えば概ね4.2に該当する。それに対して、(b)では平均機能水準は長期的に現状レベルを維持し、最低機能水準も管理下限値を下回らない。以上のことから、年間A億円の予算では舗装を長期的に適切な水準を維持出来ず、年間予算として $A + \alpha$ 億円が必要であることが理解できる。

表4-1 点検要領の判定基準に対する MCI

			わだち掘れ量 (mm)				
			A	B1	B2	C	OK
判定ランク			～20	20～15	15～10	10～3	3～0
ひび割れ率 (%)	A	15～	4.15	4.60	4.98	4.98	4.98
	B1	10～15	4.54	4.99	5.48	5.55	5.55
	B2	5～10	5.11	5.56	6.05	6.39	6.39
	C	0～5	5.60	6.41	7.29	8.83	10.0
	OK	0	5.60	6.41	7.29	8.83	10.0



：共に A

：どちらか一方が A

参考： 補修なし (8.5 < MCI ≤ 10)
 表層打ち替え (4.2 < MCI ≤ 8.5)
 表基層打ち替え (0 < MCI ≤ 4.2)

4.3.4 同時施工の検討

a) 同時施工の有効性検討

阪神高速道路株式会社では、修繕費の中で舗装の占める割合が高く、舗装は車両の走行性や安全性、周辺への騒音や振動等に直接影響することから、舗装修繕の効率化は維持管理の合理化を図るうえで最も重要な課題の1つである。合理的な舗装修繕の課題の1つに「修繕範囲」の問題がある。舗装は使用環境等の違いによって箇所毎に劣化速度が異なる。そのため、打ち替え費用のみに着目すれば、傷んだ箇所のみをその都度修繕する「個別施工」が効率的となる。

しかし、実際にはこのような手法は採用されず、劣化が進行していない箇所も含めてある程度の範囲を同時に修繕する「同時施工」が行われる。これは、舗装修繕では交通規制が必要となり、打ち替え費用の他に渋滞損失費用等の外部コスト（社会的損失）や規制費用が発生するためである。特に、都市高速である阪神高速道路では渋滞等の社会損失が大きいことから、これらを抑えるためにロング規制や通行止めによる大規模な同時施工を実施している。同時施工の有効性は、劣化が進行していない箇所を早期に修繕することによるデメリット（過剰投資）と外部コストを抑制できるメリット（コスト縮減）との大小関係によって決定すると考えられる。

そこで、個別施工を行った場合と同時施工を行った場合のトータル費用を算出し、それらの比較を通じて同時施工の有効性を検証した。また、検証結果を踏まえて、阪神高速道路の全路線の中で同時施工が有利となる区間を選定するとともに、同時施工によるコスト縮減効果を算出した。

同時施工の有効性は、以下の手順で検証する。まず、阪神高速道路の実態に即したモデル路線を設定する。次に、モデル路線に対して個別施工と同時施工を行った場合に発生する費用をH-BMSによってシミュレーションする。最後に、それぞれのケースにおいて発生する今後100年間の費用総額（トータル費用）を比較することで同時施工の有効性を検証する。

検証ケースを表4-2に示す。点検と同様、補修も標準的な手法を定めた補修要領[24]を策定しており、舗装のわだち掘れとひび割れ（応急補修を除く）に対しては打ち替え補修を標準としている。

また、舗装修繕は交通規制を伴うため、阪神高速道路株式会社では公安委員会との協議によって修繕に伴う規制延長は最大2kmと定められている。さらに、高速道路規制に伴う渋滞損失が非常に大きいことを踏まえて、1路線を1週間程度全線通行止めすることによる集中工事を行っており、舗装修繕（打ち替え）は基本的にこの時に合わせて集中的に実施している。

検証ケースは、1回の規制長が最大2kmであることと、これまで毎年通行止めによる集中工事を実施していることを考慮し、1径間、1車線毎に規制を行う1径間規制（ケース1）、2km毎に1車線規制を行う2km規制（ケース2）、全線にわたって1車線規制を行う全線1車線規制（ケース3）の3ケースとした。なお、ケース3は全線通行止めと異なるが、全線通行止めの条件では渋滞損失費用の算出に用いる交通流シミュレーションモデル[21]の計算精度が低下し、実態との乖離が大きくなることから上記のように設定した。

モデル路線は、阪神高速の実態を反映するために、実際の路線の中から代表路線を選定し、それを基に設定した。代表路線は、中心部と末端部の交通量の差が大きく交通量や渋滞損失の変化に伴う傾向が把握し易いこと、現時点でのMCI値のばらつきが全線とほぼ同じ傾向を示すこと、前年度に点検が行われており点検データが充実していること等の理由から阪神高速道路11号池田線（環状分岐～池田、蛍池線含む）を選定した。また、傾向を分析しやすくするために、代表路線に対して車線は全て2車線、床版は全てコンクリート床版とし、本線、車道以外の非常駐車帯等は除外するとの補正を施し、モデル路線を単純化した。設定したモデル路線の区間数を表4-2に示す。

表4-2 検証ケース（坂井(2008)²⁴⁾

	ケース1 1 径間規制	ケース2 2km 規制	ケース3 全線1 車線規制
区間数	2,080	32	4
規制日数	1 日	2 日	4 日

b) 劣化曲線の設定

同時施工では、施工範囲内に複数の区間（径間、車線）が含まれるため、修繕タイミングは同時施工範囲内に含まれるある区間が最適管理水準に達した段階で実行される。そのため、同時施工を考慮するケース2とケース3では、同時施工範囲の中で最も低い機能水準を当該施工範囲の機能水準とした。

また、池田線における最新の路面点検データをもとに、施工範囲の違いが修繕タイミングに与える影響を調べたところ、劣化の不確実性によって修繕タイミングに達するまでの劣化速度はケース1に対してケース2が1.56倍、ケース3が1.80倍となった。よって、ケース2とケース3ではケース1の劣化曲線を上記の比率で補正した曲線を用いた。ケース1～3の劣化曲線を図4-9に示す。なお、ケース1の劣化曲線は池田線のRC床版に対する過去の点検結果を集計し、最尤推定法によって各MCI値に到達までの年数を算出して設定したものである。ケース1～3の規制日数はそれぞれ1日、2日、4日とし、基本的に休日の昼間に行う条件とした。

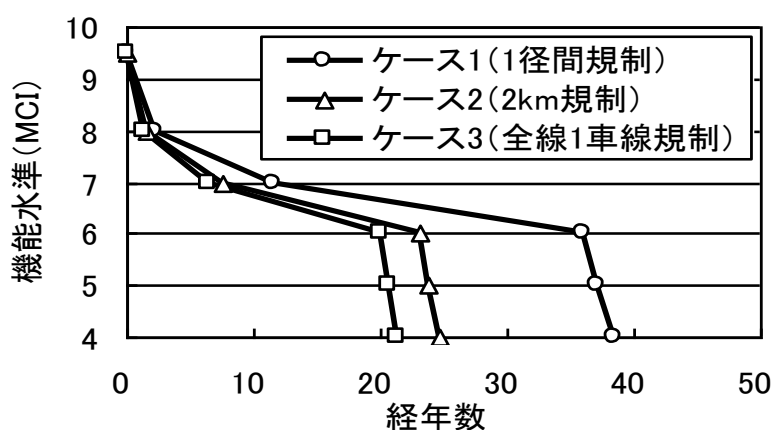


図4-9 規制タイプ毎の劣化曲線（坂井(2008)²⁴⁾）

c) トータルコストの算出

以上の条件から、H-BMSによってケース1～3に対するトータル費用を算出する。H-BMSでは、無限遠方までに発生する費用の割引現在価値（社会的割引率4%）の累計額をLCCと定義し、LCCが最小となる最適管理水準を計算することができる。本検証では舗装の機能水準（MCI）が最適管理水準に達した時点で直ちに修繕が実行されるものとし、今後100年間に発生する修繕費用、維持費用、渋滞損失費用、車両走行費用の合計をトータル費用として算出する。

ケース1～3に対して算出された今後100年間のトータル費用（修繕費用＋維持費用＋車両走行費用＋渋滞損失費用）の年平均を表4-3に示す。表4-3よりトータル費用に占める割合は渋滞損失費用が圧倒的に大きく、同時施工を行うケース2とケース3では規制回数の減少に伴って、渋滞損失費用が大幅に低下した。一方、修繕費用はトータル費用の合計期間を100年としたことによって多少の誤差が発生しているが、若干増加する傾向を示した。これは同時施工によって修繕タイミングが早まるためと考えられる。但し、修繕費用の増加量は渋滞損失費用の減少量と比べると非常に小さい。

以上の結果から、モデル路線では同時施工によってトータル費用の大部分を占める渋滞損失費用が大幅に低減することが確認できた。

表4-3 トータル費用の年平均（億円/年）（坂井(2008)²⁴⁾）

		ケース1	ケース2	ケース3
直接費用	修繕費用	0.20	0.19	0.31
	維持費用	0.16	0.16	0.16
外部コスト	渋滞損失費用	47.23	8.31	3.57
	車両走行費用	0.43	0.48	0.28
トータル費用		48.02	9.15	4.32

d) 同時施工の有効性判断

モデル路線は、環状線合流部から末端部に向かって交通量が減少し、渋滞損失が低下する特徴を有している。そのため、ケース1とケース2を対象に2キロポスト毎におけるトータル費用を比較し、同時施工が有効となる条件について考察した。

両ケースにおいて、今後100年間ににおけるトータル費用を2キロポスト毎に算出した結果（年平均費用）とその差を表4-4に示す。

これより、10.0キロポストを境にケース1とケース2でトータル費用が逆転していることが分かる。つまり、0.0～10.0キロポストでは1径間規制より2km規制の方が効率的となり、10.0～14.2キロポストでは反対に2km規制より1径間規制の方が効率的となった。このように、個別施工のケース1と同時施工のケ

表4-4 キロポスト毎のトータル費用とその差（億円/年）（坂井(2008)²⁴⁾）

キロポスト	ケース1 1径間規制	ケース2 2km 規制	差
0.0～2.0	1.25	0.48	0.78
2.0～4.0	2.94	0.41	2.57
4.0～6.0	1.86	0.35	1.51
6.0～8.0	1.49	0.28	1.21
8.0～10.0	0.46	0.23	0.23
10.0～12.0	0.10	0.16	-0.06
12.0～13.4	0.05	0.11	-0.06
13.4～14.2	0.03	0.08	-0.05

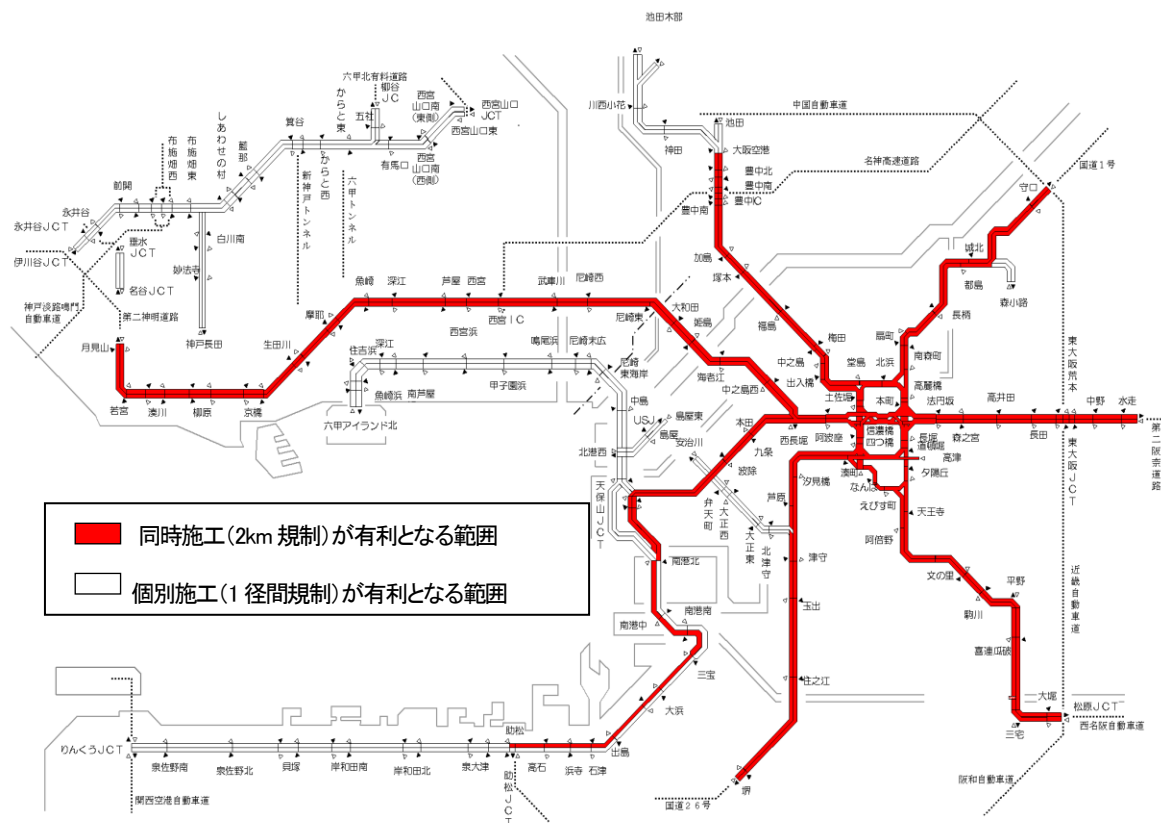


図4-10 同時施工が有利となる範囲と個別施工が有利となる範囲（坂井(2008)²⁴⁾

ース2で傾向が逆転する理由は、キロポストの増加に伴って交通量の減少し、同時施工による渋滞損失費用の抑制効果が低下するためと考えられる。個別施工と同時施工でトータル費用が逆転する8.0キロポストと10.0キロポストの1区間規制時の渋滞損失費用から個別施工が有利となる条件を求めた。その結果、1区間、1車線規制1回当たりに発生する渋滞損失費用が300万円以下になると同時施工より個別施工の方が有利となる結果となった。なお、この渋滞損失費用が発生するときの2車線当たりの断面交通量は、概ね2万台/日であった。

上記の条件にしたがって、阪神高速道路の全路線を同時施工（2km規制）が有利となる範囲と個別施工（1区間規制）が有利となる範囲に分類した結果を図4-10に示す。これより、同時施工が有利となる範囲は渋滞の発生しやすい大阪中心部からの放射路線となり、個別施工が有利となる範囲は交通量の少ない放射路線の末端部や北神戸線、車線数の多い湾岸線等となった。

e) コスト縮減額の算出

阪神高速道路の全路線を区間、車線毎に個別施工する場合と図4-10で示した範囲毎に同時施工と個別施工を使い分ける場合のトータル費用を算出し、同時施工を考慮することによるコスト縮減効果を算出した。

同時施工を考慮しないケース（個別施工）と同時施工を考慮するケース（同時施工考慮）の今後100

表4-5 全線に対するトータル費用の年平均（億円/年）（坂井(2008)²⁴⁾）

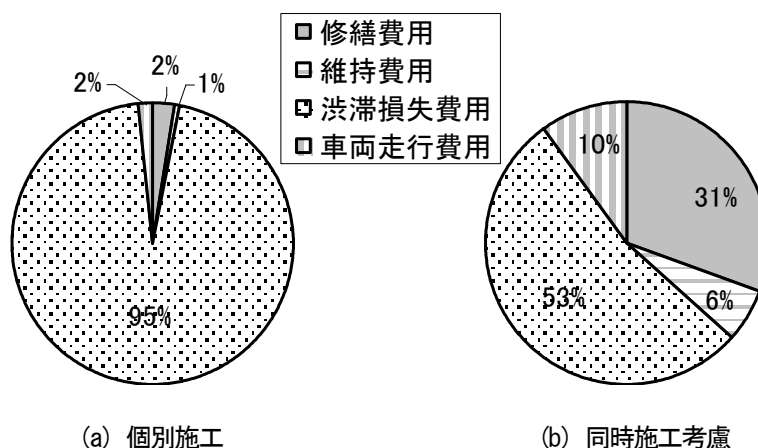
		個別 施工	同時施工考慮	
			1 径間区間	2km 区間
直接費用	修繕費用	10.0	6.3	5.1
	維持費用	2.8	0.8	1.4
外部コスト	渋滞損失費用	392.0	0.0	19.9
	車両走行費用	7.0	0.6	3.1
トータル費用		411.7	7.7	29.6
			37.3	

年間におけるトータル費用（年平均費用）の算出結果を表4-5に示す。表4-5より、同時施工を考慮することによって1年当たりの渋滞損失費用は392億円/年から200億円/年に大幅に低下した。直接費用では、修繕タイミングが早まるために修繕費用が1.4億円/年増加したが、早期の修繕によって路面の状態が良好な水準に保たれることから維持費用が0.6億円/年減少し、この2つを合わせた支出は0.8億円/年の増加となった。

一方、外部コストは、上記の渋滞損失費用に加えて、路面が良好な水準で維持されるために車両走行費用が3.3億円/年縮減され、渋滞損失費用と合わせた外部コストのコスト縮減額は376億円/年となった。

直接費用と外部コストを合計したトータル費用では、個別施工の412億円/年に対して、同時施工考慮は37億円/年となり、2kmの同時施工を考慮することによるコスト縮減額は375億円/年に達する結果となった。

また、各費用のトータル費用に占める割合を図4-11に示す。図4-11より、個別施工を行った場合ではトータル費用の95%が渋滞損失費用で占められるが、同時施工を考慮した場合では渋滞損失費用が低下する一方、修繕費用が増加するため、トータル費用に占める割合は渋滞損失費用が53%、修繕費用が31%と比較的均衡する結果となった。

図4-11 トータルコストに占める各費用の割合（坂井(2008)²⁴⁾）

修繕時機能水準に対するLCCの一例を図4-12に示す。これより、個別施工では渋滞損失費用の割合が大きいため可能な限り修繕を遅らせることが有利となるが、同時施工では渋滞損失費用が低下するため、最適管理水準が高い水準に移行していることが分かる。これより、同時施工によって渋滞損失費用を軽減することは、結果的に舗装の水準を高く維持することが有利となり、この点からも望ましい結果となった[25]。

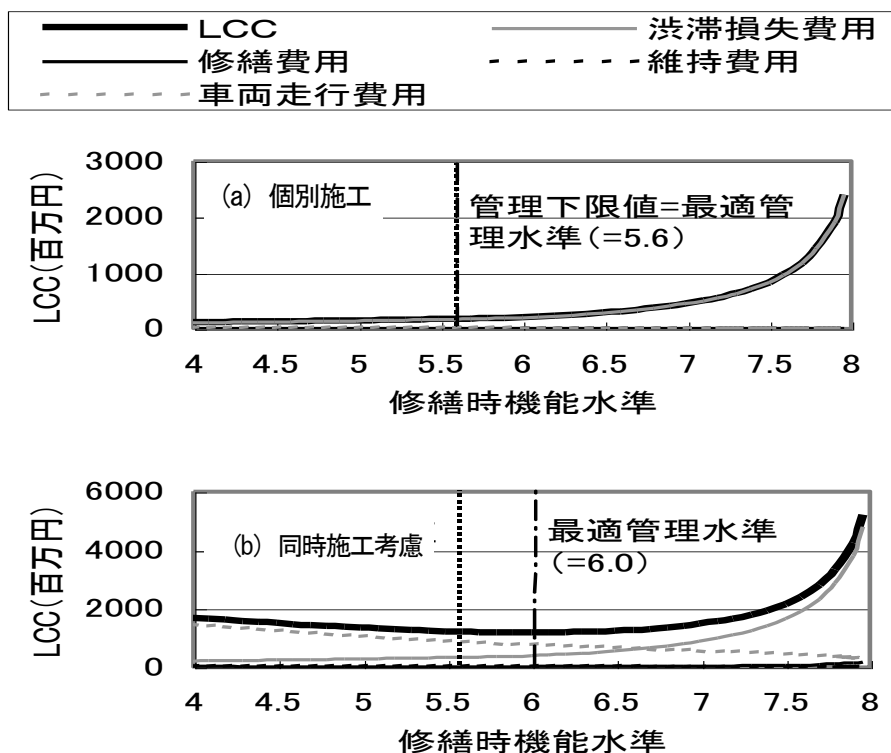


図4-12 トータル費用に占める各費用の割合 (坂井(2008)²⁴⁾)

4.4 本体構造物における最適補修計画の検討

4.4.1 劣化の時間依存性検討

構造物保全率については、2.2.3においてアウトプット指標として定義づけしたとおり構造物の各部材を適切に補修できているかを表した指標(%)であり、舗装保全率と同様、路線毎、交通量毎に区分した単位毎に計測、評価する。ここでは、劣化予測が複雑な橋梁における本体構造物のうち、コンクリート床版を対象とし、中長期的な最適な補修計画の策定を行うことにより定量評価を行うものである。

H-BMSのうち、舗装システムについては健全度の低下を表すハザード関数を経過時間に依存しない指数関数で定義し、点検結果から推定した期待値パスによって劣化曲線を設定しているが、本体構造物については、実際のところ経過年数によって劣化速度は変化すると考えられる。また、将来予測計算についても、構造物の機能水準が劣化曲線に従って確定的に低下するのではなく、将来には不確実性がある

ため、構造物が完成したときからの経過年数にも影響し劣化現象が異なっていると考えられる。そこで、経過年数に従う劣化速度の変化を表現できるワイブルハザード関数を用いて劣化の時間依存性について検討するとともに、モンテカルロシミュレーションによって不確実性を考慮した将来予測計算を実施し、確率モデルの有効性について検討した。

さらに、H-BMSを活用したマネジメントについて考察し、目的に応じて確率モデルと確定モデルを使い分ける活用方法を提案した。

前述したように、H-BMSでは、点検データから確率推移行列を推計する際のハザード関数を指数関数とし、確率推移行列は経過年数に関係なく一定と仮定している。これは、建設から1年後の劣化速度と100年後の劣化速度が同じと仮定していることになるが、実際には建設直後と100年後の劣化速度は異なると予想される。このため、点検データを用いて劣化の時間依存性を確認する。

a) 検討方法

検討方法として、1) 経過年数が劣化速度に与える影響検討と、2) ワイブル関数と指数関数による比較検討の2つの方法を実施する。1) では、点検データを竣工からの経過年数毎にグループ化し、ハザード関数を指数関数としてグループ毎に確率推移行列を推定し、これから劣化曲線を算出する。算出した劣化曲線は経過年数毎にグループ化しているので、経過年数毎に劣化速度が異なっていれば、劣化曲線に差が現れる。2) では、ハザード関数にワイブル関数に用いたときの劣化曲線を計算し、指数関数を用いたときの算出結果を比較する。

このように2つの検討を行う理由は、2) では θ と α の2つの変数を推計するため最適解を求めることが困難であり、計算時間が非常にかかるためである。

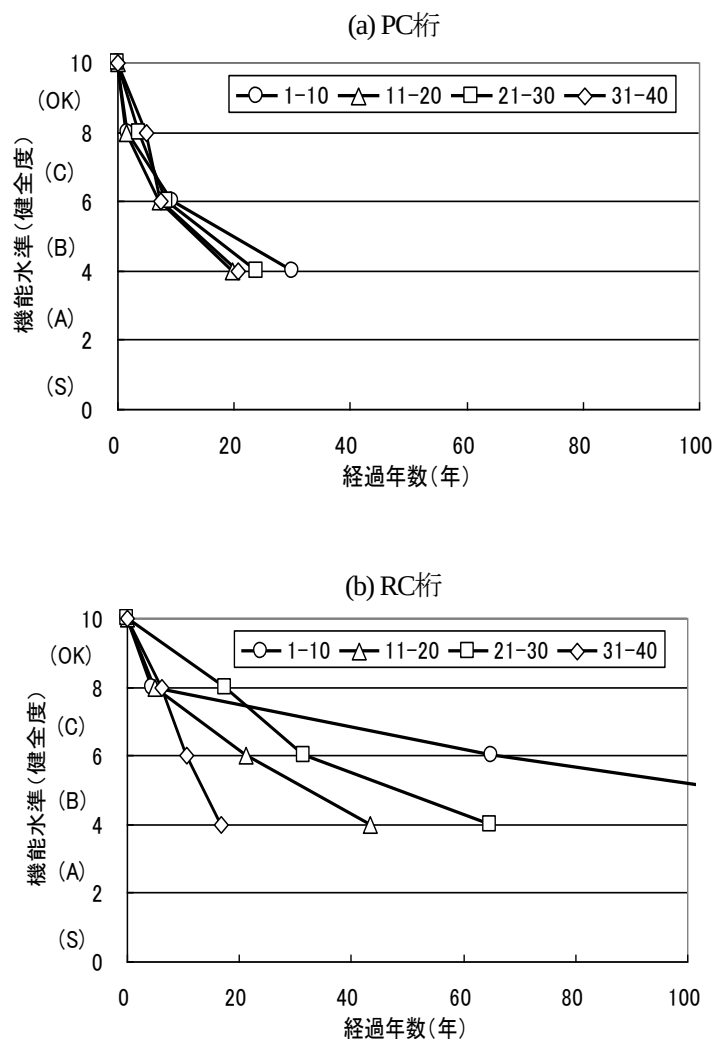
検討では、コンクリート桁、コンクリート橋脚、床版の3工種を対象とし、保全情報管理システムに蓄積されている最新の資産、点検、補修データを用いる。

b) 検討結果

1) 経過年数が劣化速度に与える影響検討

経過年数10年毎に劣化曲線を計算した結果の例として、PC桁とRC桁の劣化曲線を図4-13に示す。これより、PC桁は経過年数に関係なくほぼ同じ劣化曲線となり、経過年数に伴う劣化速度の変化が見受けられなかった。

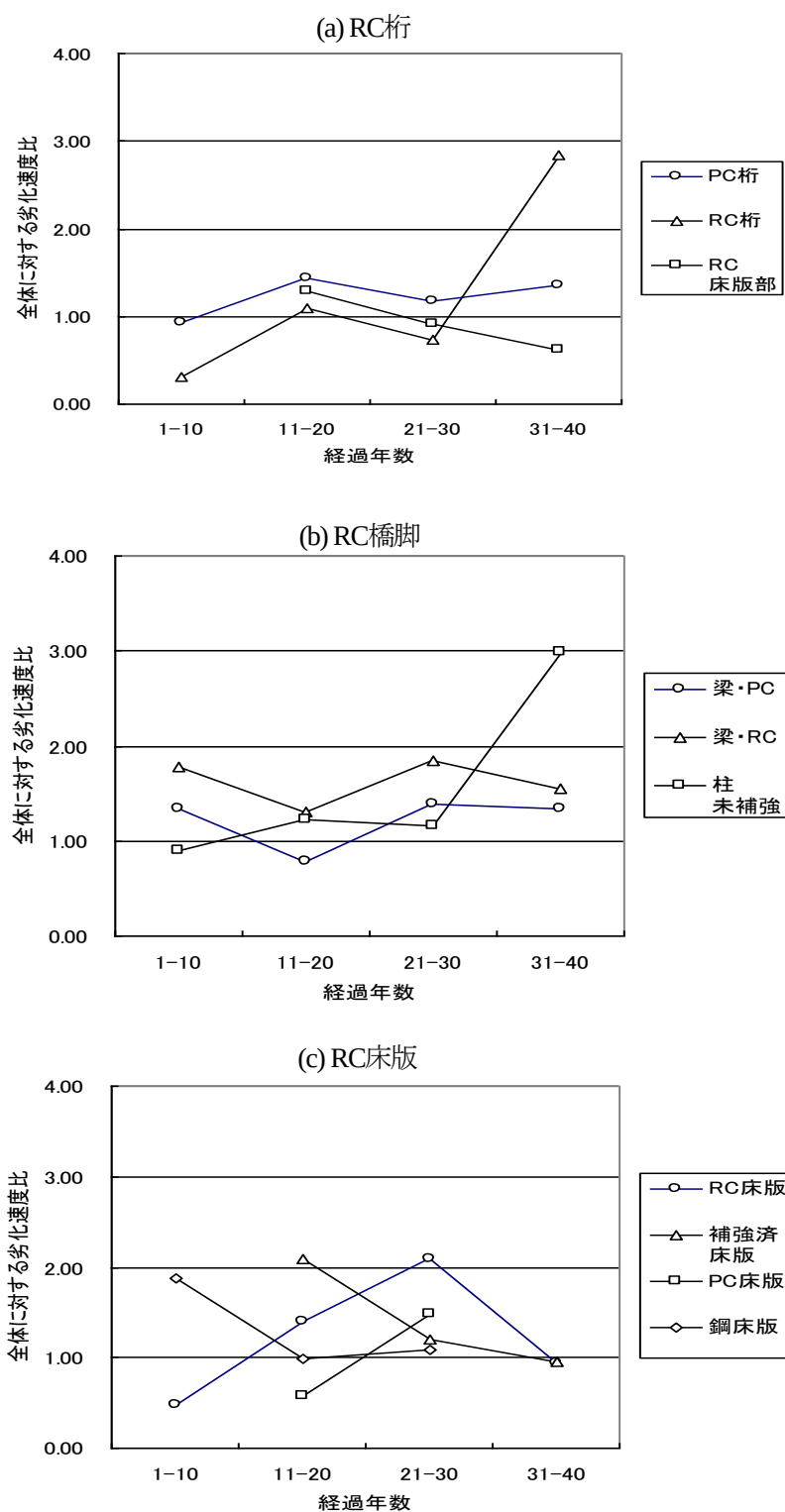
一方、RC桁は経過年数によって劣化曲線が大きく変化し、経過年数に伴う劣化速度の変化が見受けられた。また、経過年数1年～10年の劣化が最も遅く、経過年数31年～40年の劣化が最も早い結果となり、経過年数の増加に伴って劣化速度が速くなる傾向が見受けられた。

図4-13 経過年数による劣化曲線の変化 (坂井(2008)²⁵)

次に、10年毎の経過年数毎に分けない全体データから算出した劣化曲線を基準に、経過年数10年毎のデータから算出した劣化曲線の速度比をプロットした結果を図4-14に示す。なお、図4-14(a)のRC床版部は、RC桁と一体打設された床版部を指しており、図4-14(b)の梁・PCと梁・RCはそれぞれコンクリート橋脚の張り出し梁の部分がPC構造のものとRC構造のもの、柱・未補強は柱部で鋼板接着補強が施されていないものを指している。

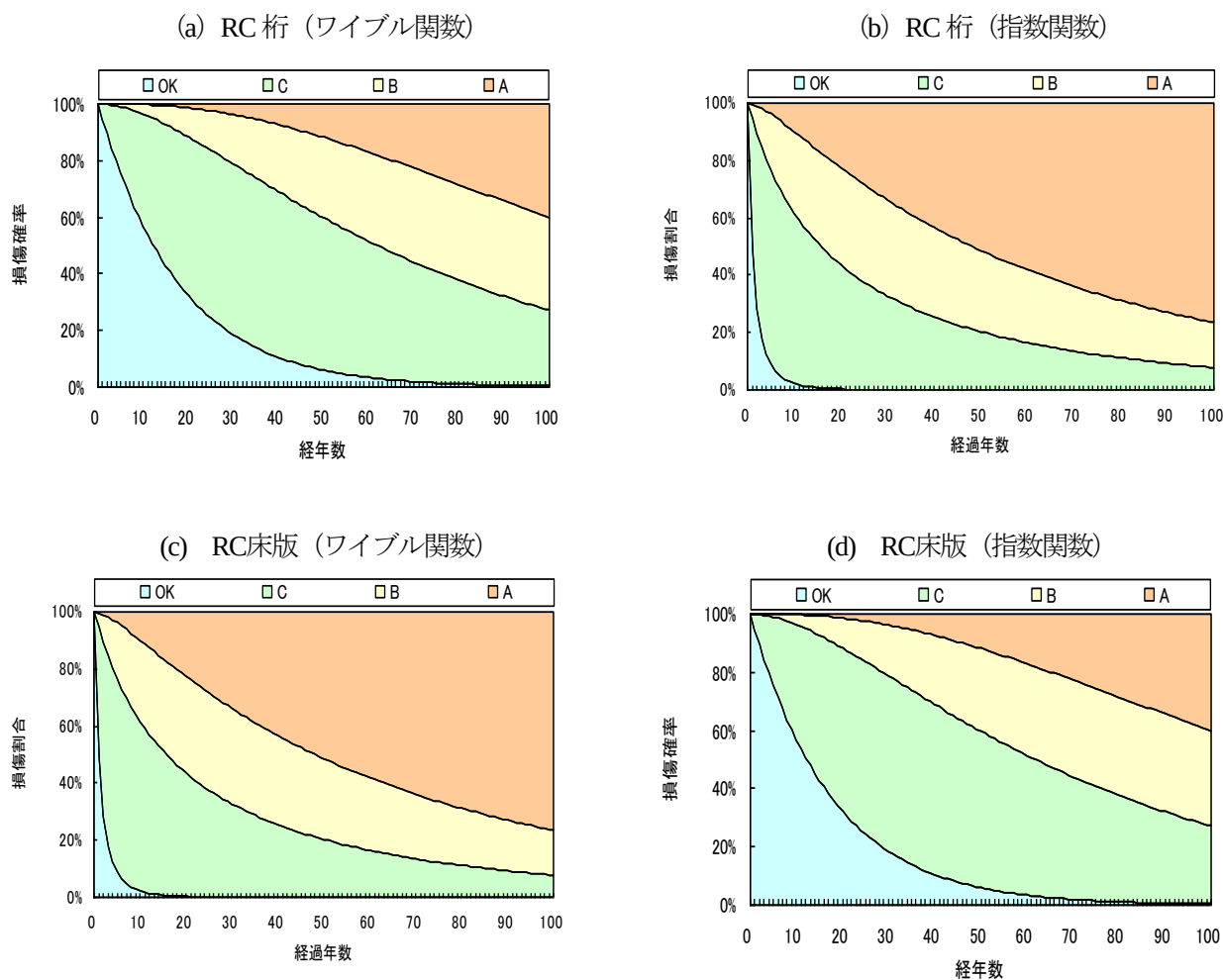
図4-14より、コンクリート桁のPC桁とコンクリート橋脚の柱・未補強は、経過年数の増加に伴って劣化速度が速くなる傾向を示したが、コンクリート桁のRC床版部や鋼床版、補強済床版は、逆に経過年数の増加に伴って劣化速度が遅くなる傾向を示した。また、PC桁、梁・PC、梁・RCは経過年数の増加に伴ってあまり変化しなかった。

また、PC床版は経過年数が1年～10年と31年～40年の劣化速度が遅く、その間の11年～20年と21年～30年の劣化速度が速くなる変則的な傾向を示した。

図4-14 経過年数による劣化曲線の変化 (坂井(2008)²⁵)

2) ワイブル関数と指数関数による比較検討

ワイブル関数と指数関数の2つのハザード関数で推計した確率推移行列の結果の例として、RC床版の損傷確率の推移図を図4-15に示す。図4-15は、経過年数0年時点で100%健全(OK)である

図4-15 ワイブル関数と指数関数の推計結果 (坂井(2008)²⁵)

場合に、時間の経過に伴って健全度が低下する様子を表している。図4-15より、RC床版では、指数関数よりワイブル関数の方が健全度の低下が早くなる結果となった。しかし、RC桁では、指数関数よりワイブル関数の方が健全度の低下が遅い結果となり、RC床版と逆の傾向となった。

c) 結果に対する考察

経過年数が劣化速度に与える影響については、一部の部材において経過年数の増加に伴って劣化速度が速くなる傾向が見られたものの、全体的には一定の傾向が確認できなかった。また、ワイブル関数と指数関数による比較でも、ワイブル関数では経過年数に伴う劣化速度の増加が考慮できることから、指数関数よりワイブル関数の方が劣化が早くなると思われたが、RC床版では予想した傾向が得られたものの、RC桁では、逆にワイブル関数の方が劣化が遅くなる結果となった。以上の結果より、劣化の時間依存性を明確に確認できなかった原因としては、以下の理由が考えられる。

- 1) 阪神高速道路では構造物を高い水準で維持しているため、健全度の低いデータが十分蓄積されない。
- 2) 経過年数が最大でも40年程度であり、損傷が多数発生する摩耗期に到達していない。

3) 点検データを工種や経過年数毎に分割したことによってデータ数が少なくなりバイアスがかかった。

快適な道路交通サービスを提供するために損傷や劣化を早期に対処すると、結果的に健全度の低い観測データが観測されない。また、長期間供用され続けた構造物の劣化を観測するためには時間の経過が必要となる。

今回の検討では、全データを対象に検討したため大部分が健全なデータであった。劣化の時間依存性を確認するためには、現データから劣化の早いものを抽出し、これらの分析を通じて劣化の時間依存性を確認することが考えられる。また、長く供用されている構造物や健全度の低い構造物の情報を得るためには、他の事業者と連携し、技術や情報の共有化を図ることも有効と考えられる。

4.4.2 不確実性を考慮した確率モデルの提案

a) 将来予測検討

H-BMS の将来予測計算では、構造物の機能が劣化曲線にしたがって確定的に劣化すると仮定している。

しかし、4.4.1 で述べたように本体構造物における実際の劣化には不確実性があり、H-BMS の将来予測は実現と一致していない。不確実性を考慮した将来予測手法にはモンテカルロシミュレーションがあり、乱数を用いた繰り返し計算によって不確実性を表現することができる。ただし、モンテカルロシミュレーションには、計算時間がかかることや計算の打ち切り判断が必要である等の技術的な問題がある。ここでは、鋼桁を対象に、H-BMS とモンテカルロシミュレーションによる将来予測結果を比較し、不確実性を考慮した予測手法の適用性について考察する。なお、構造物の機能低下が確定的な劣化曲線にしたがうと仮定した計算モデルを確定モデル、モンテカルロシミュレーションのように不確実性を伴って劣化する計算モデルを確率モデルと呼ぶ。

ここでは、保全情報管理システムに蓄積されていた最新の鋼桁の資産、点検、補修データのうち、疲労き裂に関連するデータを使用する。図4-16に使用データから推計した確率推移行列の確率推移図と平均劣化曲線（期待値パス）を示す。

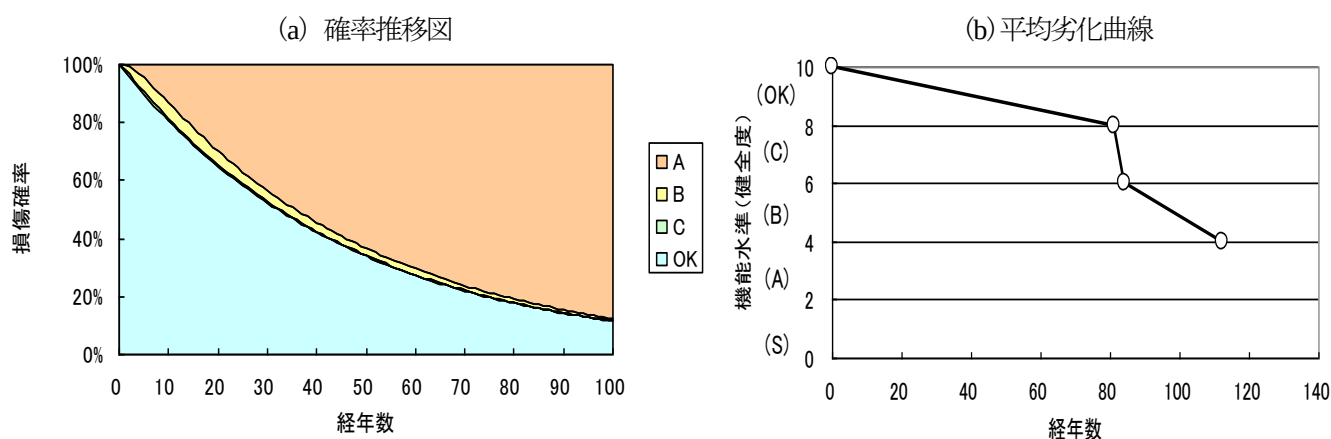


図4-16 確率推移図と平均劣化曲線（坂井(2008)²⁵）

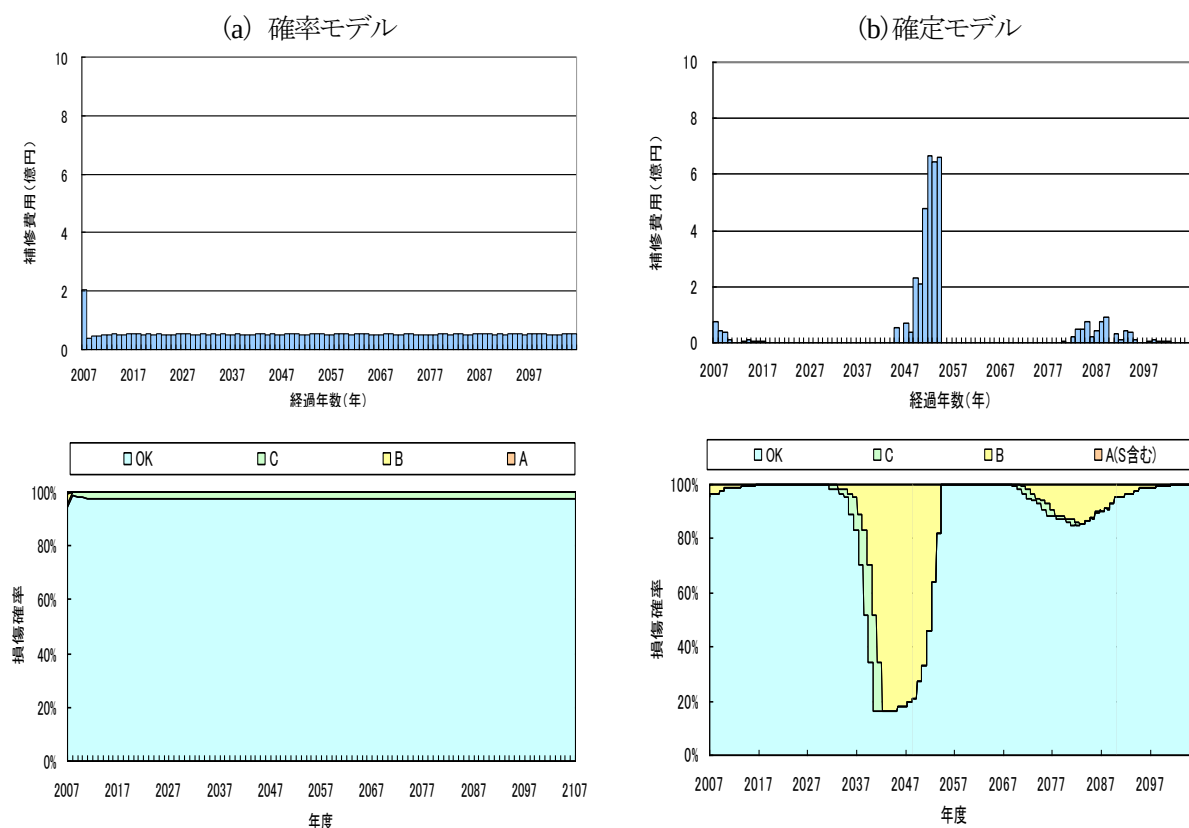


図4-17 予算制約がない場合の将来予測結果 (坂井(2008)²⁵)
(上段:健全度の推移, 下段:費用の推移)

b) 将来予測検討結果

1) 予算制約がない場合

図4-17に、予算制約がない場合における確率モデルと確定モデルによる将来予測の計算結果として、今後100年間の費用と機能水準割合の推移を示す。図4-17より、確率モデルと確定モデルでは全く傾向が異なる結果となった。確率モデルでは、初年度の費用がやや高いものの、5年程度で定常化し、それ以降は費用と機能水準とともに一定に推移する。一方、確定モデルでは、約40年後から急激に機能が低下し、それに伴って費用も急激に増加している。このような結果となった理由は、確率モデルでは確率推移行列が一定であるため、定常化すれば健全度が補修水準に低下する区間数が一定となり、確定モデルでは劣化曲線にしたがって機能が低下するため、建設時期の集中の影響がそのまま反映されるためである。

2) 予算制約を考慮した場合

予算制約を考慮した場合でも確率モデルと確定モデルで全く傾向が異なった。確率モデルでは費用が一定となり、機能の低下も滑らかに増加するが、確定モデルでは補修が集中するまでは費用が発生しない時期が生じ、機能も急激に変化する。また、機能を継続的に維持できる予算制約額は共に1億円/年となり、確率モデルと確定モデルのどちらでも同じ結果となった。

確率モデルと確定モデルによる将来予測計算の結果を以下にまとめる。

- 1) 予算制約の有無に関わらず、費用と機能水準の推移傾向は確率モデルと確定モデルで大きく異なる。
- 2) 確率モデルでは定常化すると費用と機能水準の推移が一定となり、確定モデルでは急激に変化する。
- 3) 機能を継続的に維持するために必要な予算制約額は、確率モデルと確定モデルで同じ結果となる。

確定モデルでは、費用や機能水準が急激に変化するが、実際には劣化の不確実性によってある程度平準化すると予想される。一方、確率モデルでは、定常化すると費用と機能水準の変化が一定となる。これは、現時点では確率推移行列を時間の経過に関わらず一定としているためであるが、実際には建設時期の集中による影響を受けると予想される。この他、確率モデルでは、1) 優先順位を決定できない、2) 計算時間がかかる、3) 精度を確保するために必要な条件設定が必要等の課題が判明した[26]。

4.4.3 相対評価モデルを用いた補修優先順位の検討

a) 相対評価の方法

土木施設の劣化過程は、同一の構造や材料特性、かつ使用条件の下であっても、構造物が置かれている環境条件、施工時における品質等により、多様に異なることが一般的である。阪神高速道路株式会社では5～8年の間隔で近接目視による定期点検が実施され、構造物の健全度が判定される。点検履歴を確認すると、点検間隔が5年程度にもかかわらず、点検結果が健全であるOKランクから補修が必要と判断されるAランクになっている径間や、短い点検間隔の中でOKランクからBランクに劣化している径間が存在する。橋梁は比較的寿命が長いといわれる中で、劣化が速いと評価されるのには、何らかの原因があるものと考えられる。このような箇所は全体と比較して、相対的に劣化が速くなっていることが考えられる。

小濱ら[27]はこの点を視野に入れて、点検結果を統計的に分析し、土木施設間の劣化速度の多様性を異質性パラメータを用いて表現する混合マルコフ劣化モデルを提案するとともに、標準的な劣化過程を表現するベンチマーキング劣化曲線の作成と、個別土木施設における劣化速度を相対評価できるような方法論を併せて提案している。ここでは、H-BMS対象工種（舗装、塗装、伸縮継手、床版、コンクリート構造物、鋼構造物、支承）について、阪神高速道路株式会社における保全情報管理システムに蓄積されている最新の目視点検データを用いて、劣化速度の異質性を分析することによって劣化の進行が早い早期劣化箇所を抽出する。抽出した早期劣化の原因や傾向を調べることによって、早期劣化に対する有効な対策方法を見出すことを目指す。早期劣化の抽出には、ベンチマークによる相対評価モデルを用いる。

相対評価とは、対象とする全ての点検データから推計した平均ハザード率 θ_i をベンチマークとし、このベンチマークからの乖離を異質性パラメータ q^k によって評価することで、径間毎の劣化速度を相対的

に評価する手法である。ここで、異質性パラメータは点検データから最尤推定するとともに、相対評価モデルでは説明変数を設定することで劣化の要因分析が実行できる。

相対評価モデルは対象とする全ての点検データから多段階指数ハザードモデル[15]で推計された平均ハザード率 λ_i^k をベンチマークとして、径間毎の劣化速度がベンチマークからどの程度ずれているかを異質性パラメータ ε^k で表示することにより相対的に評価するモデルである。

橋梁 k の劣化パラメータは、

$$\lambda_i^k(y_i) = \lambda_i(y_i) \times \varepsilon^k \quad (4.4.15)$$

$$\lambda_i = \exp(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \cdots + \beta_L x_L) \quad (4.4.16)$$

と表記することができる。ここに、 i は部材の健全度、 $\lambda_i(y_i)$ はハザード関数、 ε_k は橋梁 k の劣化速度とベンチマークとの比、 y_i は時間軸上の時点、 θ_i は定数（未知パラメータ）、 β は要因毎の劣化速度を示すパラメータ x は構造等の要因である。ハザード関数 $\lambda_i(y_i)$ はある時点 y_i で、健全度が i であることがわかっている部材が次の瞬間も i に留まる条件付き確率を表している。

ε^k が標準 Γ 分布

$$f(\varepsilon^k : \phi) = \frac{\phi^\phi}{\Gamma(\phi)} (\varepsilon^k)^{\phi-1} \exp(-\phi \varepsilon^k) \quad (4.4.17)$$

に従うと仮定すると、 ε^k は平均が1.0であり、かつ分散が $1/\phi$ となり、

$$\int_0^\infty \lambda_i^k f(\varepsilon^k, \phi) d\varepsilon = \lambda_i \int_0^\infty \varepsilon^k f(\varepsilon^k, \phi) d\varepsilon = \lambda_i \quad (4.4.18)$$

が成立し、ベンチマークと一致する。この ε^k の値が1より大きい場合には、ベンチマークよりも劣化速度が速いと考えることができ、逆に1より小さい場合にはベンチマークよりも劣化が遅いと考えることができる。 ε^k の値が大きいと相対的に劣化が早いと評価することができ、上位に位置する橋梁は他の橋梁と比較して、劣化が早くなる原因が存在すると解釈できる。

この手法は ε^k の値で橋梁毎の相対的な劣化速度を統計的な視点から評価するする手法であり、劣化が速くなる原因を詳細に分析するものではない。

従って、劣化が早くなる原因については、点検履歴を確認し、損傷写真等を精査する必要がある。

b) 相対評価による重点課題の抽出

阪神高速道路株式会社 の保全情報管理システムに蓄積されている最新の目視点検データを用いて相対評価を実施した。データは「舗装」、「塗装」等工種毎に径間や脚単位で記録されており、「舗装」はさらに車線毎にも分割されている。データの記録単位を相対評価の計算単位として、径間や脚毎に劣化曲線

を描き、相対的な劣化速度の違いを評価する。

図4-18に舗装に関する相対評価結果の一例を示す。舗装は表層、基層の下構造によって、劣化速度に系統的な違いがみられる。従って、表層、基層より下の構造毎に相対評価を実施した。全ての構造で劣化が大きくばらついているが、土工部はMCIが1.5に到達するまでの期間が他の構造よりも速くなった。

鋼床版部はコンクリート床版部と比較してMCIが1.5に到達するまでの時間が長くなるが、MCIが9.5付近から4.5付近までは劣化速度が速い傾向がみられる。劣化速度が速い上位5%を早期劣化グループとして一次抽出し点検履歴や損傷写真を精査する。この中から、真に劣化が早い箇所を抽出し、劣化が早い原因を追求することにより、全社的な課題をみつけだし、重点課題として取り組むことが考えられる。

また、何らかの原因で、劣化が早くなっている場合、その原因を除外するにより、施設全体の劣化速度を改善することができ、コスト削減等の改善につながる。このように相対評価によって着目すべき早期劣化箇所を絞り込み、その分析を行うことで業務改善につながる方策を見出すことができるとともに、相対評価は全社的に取り組むべき維持管理上の重点施策を決定するための仕組みといえよう。

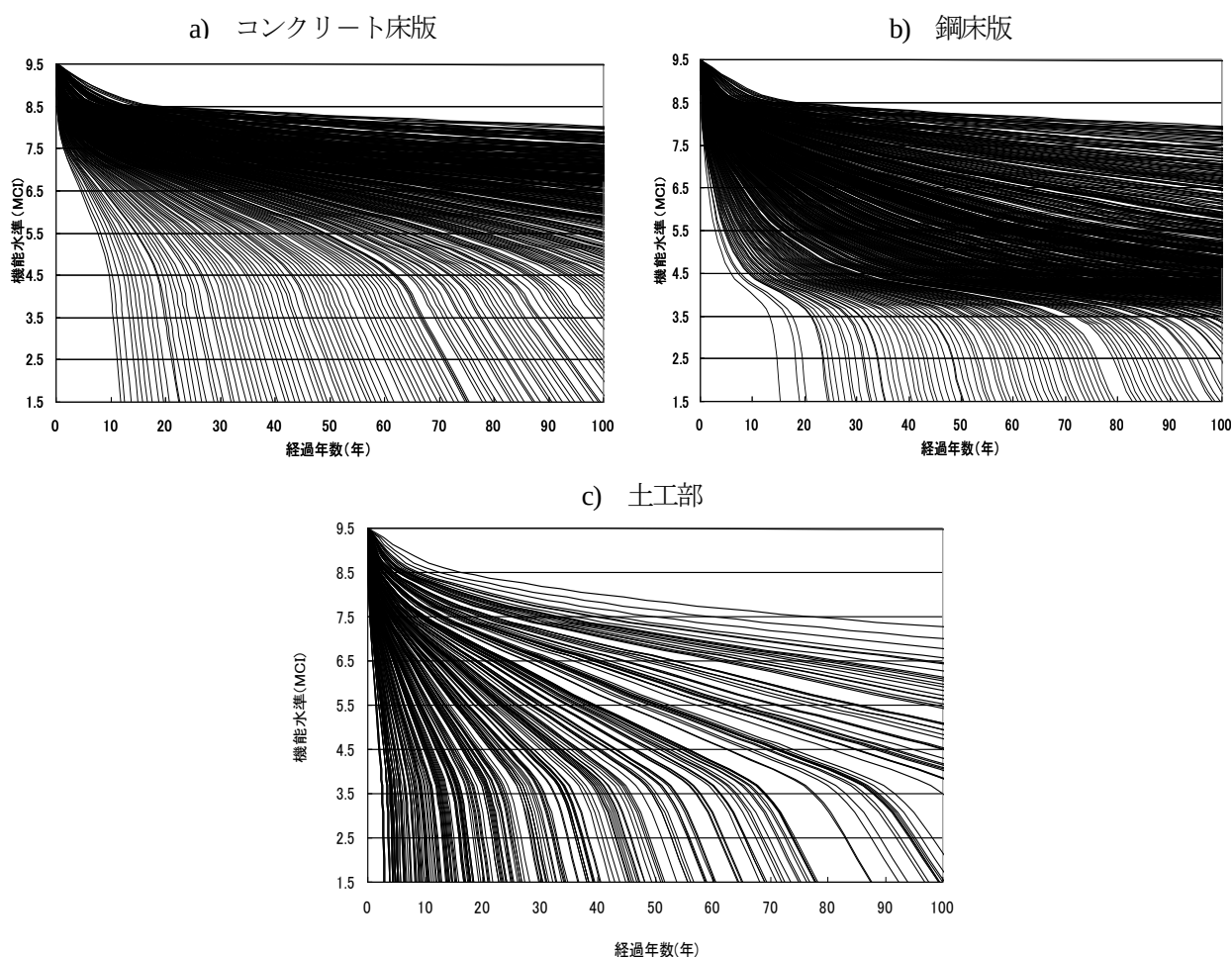


図4-18 相対評価結果（舗装）

c) 早期劣化対策によるコスト縮減額の算出

相対評価モデルの予測機能を用いることで、早期劣化グループの劣化速度を標準劣化グループと同じレベルまで低減させ場合のコスト縮減効果を確認することができる。

費用算出にあたってはa) 繰返し補修シナリオ、b) 抜本対策シナリオに対する費用予測を行うことで、早期劣化の抜本対策によるコスト縮減効果を算出する。a) では、早期劣化と標準劣化の各グループに含まれる径間がそれぞれの劣化モデルにしたがって機能が低下するものとし、b) では、早期劣化グループは抜本的対策が行われたことによって、全てが標準劣化グループの劣化に従い、機能低下が軽減されるものと仮定して、リスク評価に基づく将来予測を実施する。

抜本的対策によるコスト縮減額の計算した結果、図4-19に示すように早期劣化対象となる上位5%に対して、抜本的対策によるコスト縮減額は2009年度から2050年度までの42年間で、総額約600億円(約14億円/年)と試算された。

なお、コスト縮減額が最も大きいのは塗装であり、42年間では、約280億円(約7億円/年)である。

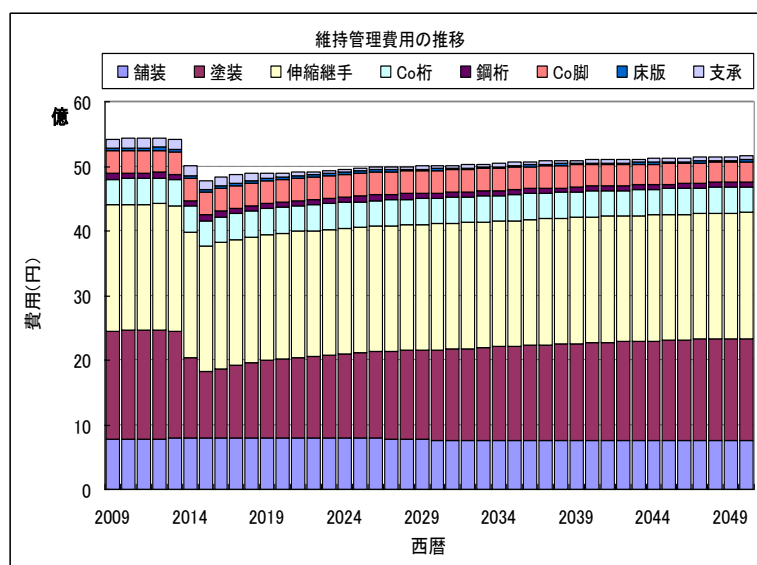
また、工種毎に、抜本対策費用がコスト縮減額よりも低く抑えられる場合には、早期劣化グループに対する抜本対策の投資効果があると考えられる。全ての工種のコスト縮減額を表4-6にまとめる。工種毎にコストの縮減額が試算された。各工種で、上位5%の径間(橋脚)に抜本的対策を実施すればコスト縮減が期待できる結果となった。

試算の結果、コスト縮減額が最も多いのは塗装である。鋼桁、床版は発生費用が低いため、コスト縮減効果が非常に低い結果となった。工種毎に、抜本対策費用をコスト縮減額より低額に抑えることができれば、抜本的対策の投資効果が期待できよう。

表4-6 費用予測結果(42年間のトータル費用、単位：億円)

工種		①繰返し補修 シナリオ	②抜本対策 シナリオ	コスト 縮減額	上位5% データ数
舗装	総額(億円)	325.84	285.84	40.01	1,224
	(年平均費用(億円/年))	7.76	6.81	0.95	
塗装	総額(億円)	597.89	321.93	275.96	桁291 脚59
	(年平均費用(億円/年))	14.24	7.67	6.57	
伸縮継手	総額(億円)	818.04	692.11	125.93	833
	(年平均費用(億円/年))	19.48	16.48	3.00	
コンクリート桁	総額(億円)	166.37	103.25	63.12	148
	(年平均費用(億円/年))	3.96	2.46	1.50	
鋼桁	総額(億円)	34.65	30.26	4.39	320
	(年平均費用(億円/年))	0.82	0.72	0.10	
コンクリート脚	総額(億円)	143.02	102.11	40.92	柱348 梁213
	(年平均費用(億円/年))	3.41	2.43	0.97	
床版	総額(億円)	13.21	13.11	0.10	6,426
	(年平均費用(億円/年))	0.31	0.31	0.00	
支承	総額(億円)	77.83	29.95	47.89	437
	(年平均費用(億円/年))	1.85	0.71	1.14	
合計	総額(億円)	2,176.87	1,578.55	598.31	—
	(年平均費用(億円/年))	51.83	37.58	14.25	

a) 繰返し補修シナリオ



b) 抜本対策シナリオ

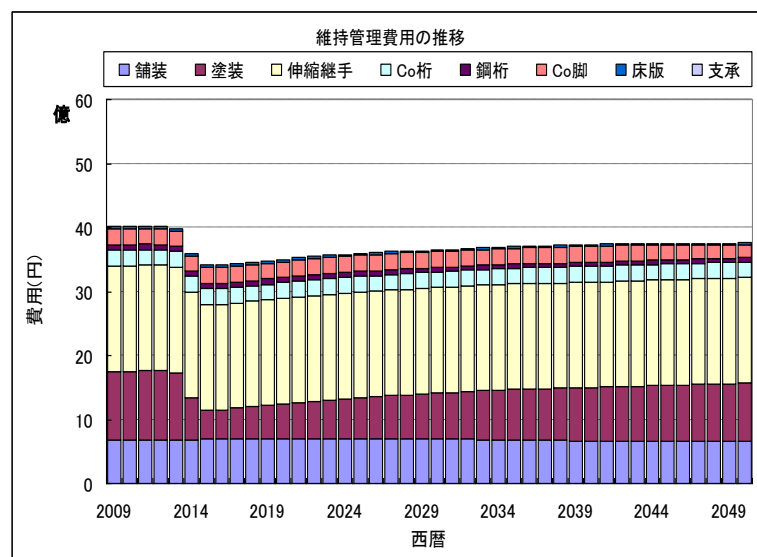


図4-19 各シナリオの費用の推移

4.5 結言

本章では、第2章で提案したロジックモデルのうち、構造物保全率、舗装保全率に着目し、阪神高速道路株式会社における橋梁マネジメントシステムであるH-BMSの劣化予測手法について検討を行った。

阪神高速道路株式会社は原則として、通行料金収入から債務を返済すると同時に施設を適切に維持管理する。このとき、劣化の不確実性と、交通量の不確実性という2つの異なるリスクに曝されることになる。特に、構造物の劣化に関わる不確実性については、会社の長期的な財政状況に大きな影響を与えることが考えられるため、劣化の不確実性をリスクとして考え、劣化リスクと維持管理費の関係について

て予測を行い、適切マネジメントする必要がある。そこで、予測手法としては、目視点検データに基づき統計的予測手法として、多段階指数ハザードモデル[15]を用いてマルコフ推移確率を推計することにより、現実の劣化過程に関する情報を劣化予測に行った。ライフサイクル費用評価にあたっては、割引現在価値法を用いているとともに、直接費用として補修費用に加えて外部費用として車両走行に伴う燃費や減価償却費用と都市高速道路の特徴である工事渋滞による渋滞損失を考慮したうえで算出を行い、路線を一度に通行止めして工事を行う大規模補修工事の有効性について確認を行った。

また、本体構造物については、構造物が完成してからの経過年数によって劣化速度は変化すると考えられ、将来予測計算についても、構造物の機能水準が劣化曲線にしたがって確定的に低下するのではなく、将来には不確実性があるため、構造物が完成したときからの経過年数にも影響し劣化現象が異なっていると考えられる。そこで、経過年数に従う劣化速度の変化を表現できるワイブルハザード関数を用いて劣化の時間依存性について検討を行うとともに、確定モデルと確率モデルの整理を行った。

経過年数が劣化速度に与える影響検討では、指数関数よりワイブルハザード関数の方が経過年数の増加に伴って劣化速度が速くなる傾向がみられると思われたが、全体的には一定の傾向が確認できなかった。これは、阪神高速道路の構造物が非常に高い水準で維持されているため、健全度の低いデータが十分蓄積されておらず、経過年数が最大でも40年程度であり、損傷が多数発生する摩耗期に到達していないことが考えられる。

さらに、土木施設の劣化過程は、構造物が完成してからの経過年数以外に、同一の構造や材料特性、かつ使用条件の下であっても、構造物が置かれている環境条件、施工時における品質等により、多様に異なることが考えられることから、ワイブル関数に基づく予測検討に加えて、小濱ら[27]が提案した土木施設の劣化過程の異質性を考慮し、この異質性パラメータを用いた混合マルコフ劣化モデルにより、H-BMS対象工種における劣化速度を相対評価を行い、構造物毎の劣化のばらつきを評価するとともに早期劣化グループの抽出を行った。今後、抽出された箇所について、その要因並びに損傷写真等を用いた絞り込みを行うことにより、維持管理計画に適切に反映していくこととしたい。

参考文献

- [1] 片山大介, 西林素彦, 閑上直浩: 阪神高速道路の橋梁マネジメントシステムについて, 第26回日本道路会議, No.11007, 2005.
- [2] Motohiko Nishibayashi, Naohiro Kanjo, Daisuke Katayama: Toward more Practical BMS: Its Application on Actual Budget and Maintenance Planning of a Large Urban Expressway Network in Japan, The Third International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, 2006
- [3] Yasuhito Sakai: Practical Asset Management System of Hanshin Expressway-Logic Model and BMS, 2nd International Workshop on Lifetime Engineering of Civil Infrastructure, pp.239-255, 2007.
- [4] 中林正司, 西岡敬治, 小林潔司: 阪神高速道路の維持管理の現状と課題, 土木学会論文集 vol.6, No.4, pp.494-505, 2007.
- [5] 川村圭, 宮元文穂, 中村秀明, 三宅秀明: 階層構造ニューラルネットを用いたコンクリート橋診断エキスパートシステムの実用化, 土木学会論文集, No.665/VI-49, 2000.
- [6] 水谷守, 足立幸郎, 小塚幹夫: 経年劣化構造物の維持補修計画最適化に関する研究, ICOSAR'95 論文集, 1995.
- [7] 古田均, 金森敦司, 堂垣正博: ライフサイクルコストを考慮した橋梁群のRC床板の最適維持管理計画支援システムに関する研究材料, Vol.47, No.12, 1998.
- [8] 古田均, 亀田学広, 他: 遺伝的アルゴリズムを用いたコンクリート橋梁群の最適維持管理計画の策定, 応用力学論文集, Vol.5, 2002.
- [9] 青木一也, 若林伸幸, 大和田慶, 小林潔司: 橋梁マネジメントシステムアプリケーション, 土木情報利用技術論文集, Vol.14, pp.199-210, 2005.

- [10] Madanat, S.: Incorporating inspection decisions in pavement management, Transportation Research, Part B, Vol.27B, 1993.
- [11] Madanat, S. and Ben-Akiva, M.: Optimal inspection and repair policies for infrastructure facilities, Transportation Science, Vol.28, 1994.
- [12] 貝戸清之, 保田敬一, 小林潔司, 大和田慶: 平均費用法に基づいた橋梁部材の最適補修戦略, 土木学会論文集, No.801/I-73, 2005.
- [13] 小林潔司: 分権的ライフサイクル費用評価と集計的効率性, 土木学会論文集, No.793/IV-68, 2005.
- [14] <http://www.pontis.com/>
- [15] 津田尚胤, 貝戸清之, 青木一也, 小林潔司: 橋梁劣化予測のためのマルコフ推移確率の推定, 土木学会論文集 No.801/ I -73, 2005.
- [16] 阪神高速道路公団: 道路構造物の点検要領, 2005.10
- [17] 有馬伸広, 毛利壮志, 荒川貴之: 「保全情報システム」の開発と運用, 阪神高速道路公団技報第 22 号, 2005.
- [18] 坂井康人, 荒川貴之, 井上裕司, 小林潔司: 阪神高速道路橋梁マネジメントシステムの開発, 土木情報利用技術論文集, 土木学会, Vol.17, pp.63-70, 2008.
- [19] 舗装の管理水準と維持修繕工法に関する総合的研究, 第 41 回建設省技術発表会, 1989.
- [20] 安崎裕, 片倉弘美, 伊佐真秋: 舗装の供用性と車両走行費用に関する検討, 第 18 回日本道路会議論文集, 1989.
- [21] 石井康裕, 田名部淳: 阪神高速道路における交通流シミュレーションの開発と運用, 第 25 回日本道路会議論文集, 2003.

- [22]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, 土木計画学研究論文集, No.18 (1), 2001.
- [23]慈道充, 江尻良, 織田澤利守, 小林潔司: 道路舗装管理会計システムアプリケーション, 土木情報利用技術論文集 Vol.13, 2004.
- [24]阪神高速道路公団: 道路構造物の補修要領, 2005.4
- [25]坂井康人, 井上裕司, 小林潔司: 都市高速道路の舗装修繕における同時施工の有効性検証, 建設マネジメント研究論文集, 土木学会, Vol.15, pp.159-168, 2008.
- [26]坂井康人, 荒川貴之, 井上裕司, 小林潔司: 橋梁の本体工における劣化の時間依存性 (ワイブル性) の検討, 第 63 回土木学会年次学術講演会, 2008.
- [27]小濱健吾, 岡田貢一, 貝戸清之, 小林潔司: 劣化ハザード率評価とベンチマーキング, 土木学会論文集 A, Vol.64, No. 4, pp.857-874, 2008.

第5章

都市高速における維持管理マネジメントの枠組み

5.1 緒言

道路関係四公団は、2005年に民営化され、高速道路会社として道路資産の維持管理等の運営を実施する。一方、各道路会社は民営化によって、資本金が5億円以上の企業となった。一般的に資本金が5億円以上の公開企業に対しては、会社法の規定により、内部統制の枠組みを構築することが求められる。

道路会社は公開企業ではないが、公開企業に準じ、内部統制の枠組みの構築が求められるとともに、高速道路という社会インフラを管理することから高い公共性を有しており、その管理運営にあたっては、効率性や透明性を確保しておくことが重要である。そのような視点からも、内部統制の枠組みの構築は不可欠と考えられる。内部統制は、企業において事業に関連するリスクをコントロールする仕組みである[1]-[2]。内部統制の枠組みの中で主要な要素はリスクマネジメントであり、内部統制はリスクマネジメントと一体と考えることができる。各道路会社においても民営化に伴い、内部統制の仕組みを構築している。維持管理業務は高速道路利用者に対するサービスレベルに直結するために、維持管理業務においても、内部統制の仕組みの中で業務が適切に行われなければならない。

そこで、阪神高速道路株式会社を例として維持管理業務プロセスとロジックモデルの関係を整理し、ロジックモデルを用いた戦略的な維持管理のための方法論を提案する。

業務プロセスは、第3章において示した内部統制とロジックモデルを踏まえ、「経営者層」、「管理者層」、「担当者層」の階層毎の業務プロセスに着目し、1) 組織の階層構造、2) 各階層間のコントロール・モニタリング、3) マネジメントサイクルによる業務改善の3つの点を考慮して構築する。

阪神高速道路株式会社の維持管理業務においては、業務を統括する執行役員、維持管理計画を立案しかつ予算配分を実施する企画グループ、現場の維持管理を担当する部門が存在し、3階層になっている。

そこで、この3つの階層構造を上から経営レベル、戦略レベル、維持修繕レベルと呼ぶこととする。

経営レベルでは戦略レベルから提示される情報から償還を完了し、事業を継続するための方針や戦略を決定する。戦略レベルでは維持修繕レベルにおける維持管理の実施状況をモニタリングし、経営レベ

ルが経営方針を決定するために必要な情報や、維持修繕レベルが維持管理を実行するための予算と情報を提供する。維持修繕レベルでは、戦略レベルから提供される方針、情報、予算に基づいて、点検や補修の具体的な実施方法を決定し、維持管理を実行する。このような構造物保全のモニタリングやコントロールは戦略レベルを中心に行われる。事業を継続的に改善させるためには、計画し実行するだけでなく、実行した結果をチェックし、改善策を講じ、次の計画につなげる PDCA によるマネジメントサイクルを形成する必要がある。

継続的に業務を改善するためには、全社的な取り組み課題を抽出し、重点課題として取り組むことが考えられる。実際に、阪神高速道路株式会社では鋼製橋脚の隅角部疲労対策や鋼床版疲労対策等の重点課題に対して、全社的な取り組みを行ってきた。これらの重点課題は損傷が顕在化してからの対策が多い。重点課題に対する取り組みを業務プロセスに組み込んでおけば、継続的に課題をみつけていく取り組みがなされ、損傷が顕在化する前に重点課題を発見できる可能性を高められる。

さらに、阪神高速道路株式会社に限らず、一般的な維持管理業務においては、中長期的な維持管理方針を策定する段階と、維持管理方針に従って、維持管理を実施する2つの段階が存在すると考えられる。つまり、2つのマネジメントの階層が存在し、上位の階層として戦略レベルと経営レベル間の業務プロセスを経営マネジメント、下位の階層として戦略レベルと維持修繕レベル間の業務プロセスを実施マネジメントと呼ぶことにする。経営マネジメントと実施マネジメントの内容はそれぞれ5.2.2と5.3.4において後述する。

また、経営レベルと戦略レベルは5年程度の中期、戦略レベルと維持修繕レベルは1年程度の短期周期で維持管理の情報をモニタリングし、互いにコントロールする。このような業務プロセスを構築し、各レベルの役割と維持管理業務の流れを明確にすることによって、維持管理業務の適正化を目指すとともに業務プロセスを改善するためには、組織の階層性だけでなく、マネジメントの階層性も同時に考慮したようなアセットマネジメントシステムを構築する必要がある。

5.2 内部統制を考慮した業務プロセスの構築

5.2.1 ロジックモデルに基づく戦略的維持管理

内部統制は、第3章で述べたように「経営者層」、「管理者層」、「担当者層」の各層が互いにコントロール・モニタリングをしながら、それぞれがPDCAサイクルによって改善する枠組みを示しており、各層の情報を円滑に伝達できる環境の構築を目指している。図5-1は阪神高速における維持管理ロジックモデルの体系を示した樹形図の一部であり、本体構造物の管理に関連したロジックモデルを示している。本体構造物は定期点検や、補修で得られる最新の健全度データを基に(5.2.1)、(5.2.2)で示す

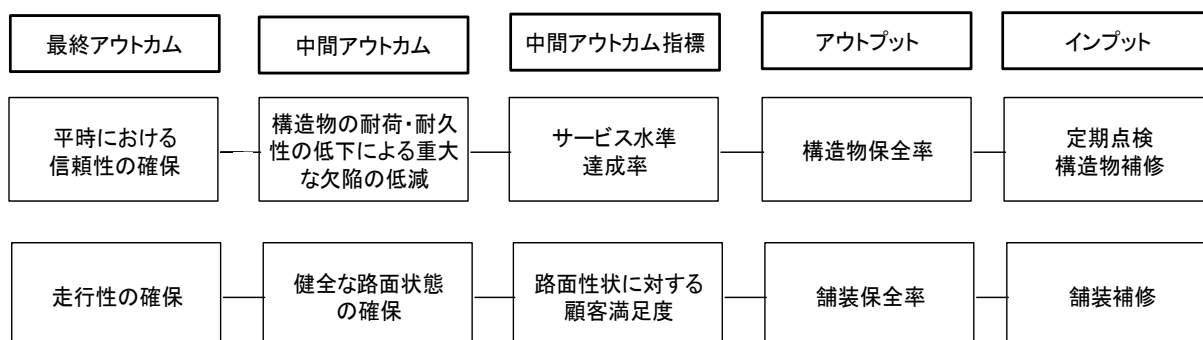


図5-1 HELM (Hanshin Expressway Logic Model) の樹形図 (一部)

$$\text{構造物保全率 (\%)} = 1 - \frac{A \text{ ランク以上の損傷がある径間 (橋脚) 数}}{\text{全径間 (橋脚) 数}} \quad (5.2.1)$$

$$\text{舗装保全率 (\%)} = 1 - \frac{\text{管理延長の内, MCI が 4 以上の延長 (km)}}{\text{管理延長 (km)}} \quad (5.2.2)$$

$$\text{サービス水準達成率 (\%)} = \frac{\text{アウトプット指標 (実績)}}{\text{アウトプット指標 (目標)}} \quad (5.2.3)$$

表5-1 各階層におけるロジックモデルの評価指標

管理階層	ロジックモデルの評価指標
経営レベル	最終アウトカム
戦略レベル	中間アウトカム
維持修繕レベル	アウトプット

「構造物保全率」, 「舗装保全率」がアウトプット指標として定義され, 中間アウトカム指標として (5.2.3) で示す「サービス水準達成率」が算出される[3].

表5-1は業務プロセスにおけるロジックモデルの評価指標の位置づけを示す. 業務の管理階層に応じて, ロジックモデルの評価指標の割り当ても異なる. また, 図5-2に経営レベル, 戦略レベル, 維持修繕レベルの階層構造に着目し, 内部統制を考慮した業務プロセスを示す.

経営レベルは役員が構成員であり, 維持管理業務の全体を把握する必要があるため, 最終アウトカムを評価指標として業務を進めていくとともに, 維持管理業務における管理方針の意思決定を行う. 経営レベルでは, 戦略レベルから報告された維持管理計画や評価指標, および相対評価モデルに基づき抽

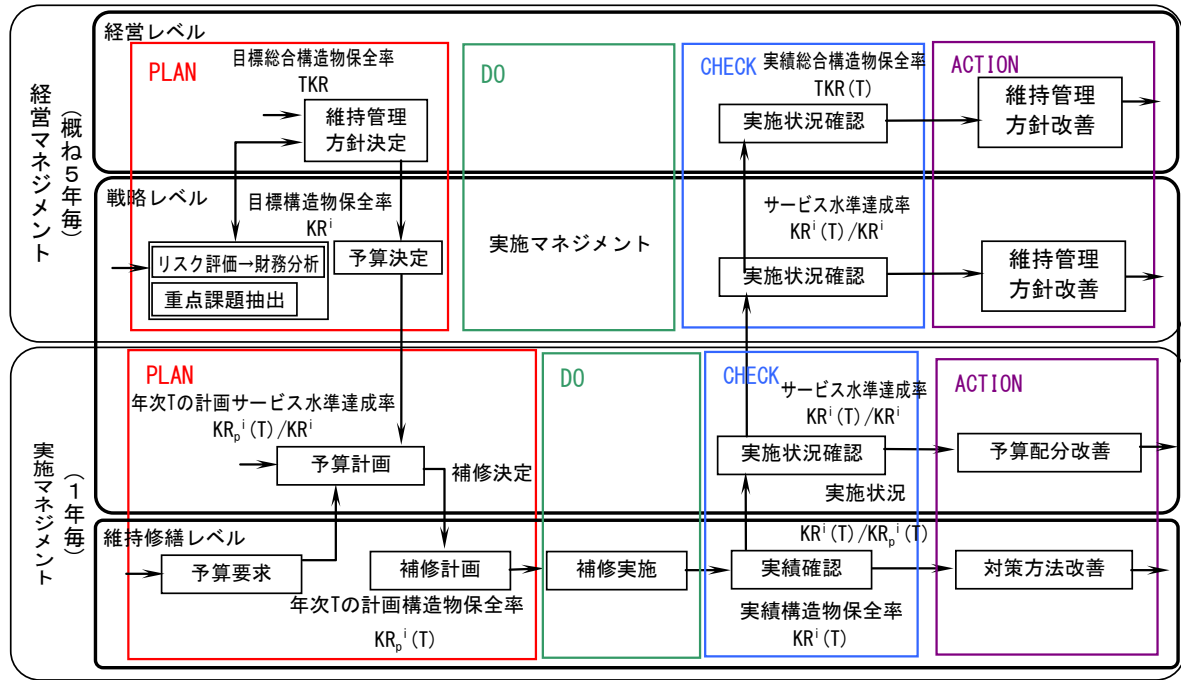


図5-2 内部統制を考慮した業務プロセス

出された重点課題に対して、承認を得る等の意思決定を行う。

また、戦略レベルは維持管理業務の中長期計画の策定、重点課題の抽出、および毎年の維持管理予算額を策定する。H-BMSは主に、このレベルで活用される。さらに、最終アウトカムでは隠れてしまう評価項目を個々に評価し、どこに問題点があるか等を整理する必要があるため、中間アウトカムに着目する。維持修繕レベルは経営レベルで決定された維持管理方針と毎年の配分予算の中で、維持管理を実施するとともに、個々の評価指標が管理水準を満足しているかに着目し、具体的な対策等を実施する。経営レベルから戦略レベル、維持修繕レベルと下位にいくほどより具体的に、詳細に指標を評価する必要がある。

次に、補修計画の策定から、実施、改善に至る業務の一連の流れをロジックモデルの枠組みを考慮して構築する。維持管理方針は上位の経営マネジメントで決定されており、毎年の維持管理予算と確保すべき管理水準は所与と仮定する。ここに、ロジックモデルの評価指標として、 $KRp^i(T)$ は時間 T 時点での工種 i の計画構造物保全率、 $KR^i(T)$ は時間 T 時点での実績構造物保全率、 KR^i は維持すべき目標構造物保全率、 $SR^i(T)$ は時間 T 時点でのサービス水準達成率と設定すると、

$$SR^i(T) = KR^i(T) / KR^i \quad (5.2.4)$$

が成立する。一方、計画に対する実施状況は、

$$KR^i(T) / KRp^i(T) \quad (5.2.5)$$

と表現することができる。全て順調に補修をすることができれば、実施状況は100%である。

5.2.2 経営マネジメント

2006年6月の日本版SOX法の整備によって不作為による企業責任が問われるようになり、維持管理のリスクは全社的问题と位置づけて取り組む必要がある。そのため経営マネジメントでは、維持管理リスクをマネジメントするための業務プロセスを構築する。

具体的には、第4章で提案した相対評価モデルを用いて点検データを分析し、早期劣化箇所の早期劣化箇所の原因追及と対策検討を戦略レベルで行い、全社的に取り組むべき重点施策を決定する。さらに、阪神高速道路株式会社は民営化後45年で債務を償還する必要がある。この目的とリスクのバランスを適切に管理するために、経営マネジメントでは戦略レベルにおいてリスク評価、および財務評価による管理水準と維持管理費用の決定をするとともに、リスクマネジメントの視点から、長期的に、阪神高速道路の管理水準を維持するための維持管理方法とその達成確率について評価し、リスク評価、財務評価に基づき、最適な管理方法で機構との協定を締結する。

また、これらを踏まえたうえで、経営方針を策定する。特に、阪神高速道路株式会社は機構との協定によって毎年度の投資額が定められており、2050年までに償還を完了することが義務付けられていることから、協定の締結で定められた維持管理費用に対して、構造物の劣化リスクがどの程度存在しているかを、定量的に評価し、経営方針を策定する必要がある。協定の見直し間隔にあったマネジメントサイクルを構築することが必要である。

さらに、継続的な改善を図るために、経営マネジメントにおいて政策評価を定期的実施する業務プロセスを構築する。阪神高速道路全体の土木構造物の劣化傾向を舗装保全率、構造物保全率によって戦略レベルで監視し、改善が必要な場合は評価指標や管理レベルを見直すことにより、構造物の状態監視と政策評価を行う。継続的な改善を目指すためには、経営マネジメントにおいて、中長期的な維持管理計画を策定するだけでなく、相対的に劣化が早い径間を抽出し、劣化が早くなる原因を追究することが重点課題の抽出につながる[4]。

ここでは、経営マネジメントにおける業務の流れとロジックモデルにおける指標との関係を理解するために、図5-2で示した業務プロセスにおいて、具体的な指標を用いた試行を行う(図5-3)。試行を行うにあたって、ロジックモデルの評価指標を(5.2.4)、(5.2.5)のとおり設定する。

a) 計画段階

戦略レベルでは、ある年次 T において、戦略レベルである本社企画部門は前年度までで得られた直近の目視点検データに基づき、最新の構造物保全率 $KR^j(T-1)$ を出先部門から得る。そして、リスク評価を行うために、BMSを用いて劣化予測を行い、部材毎に確率推移行列を算出する。維持管理方針で維持す

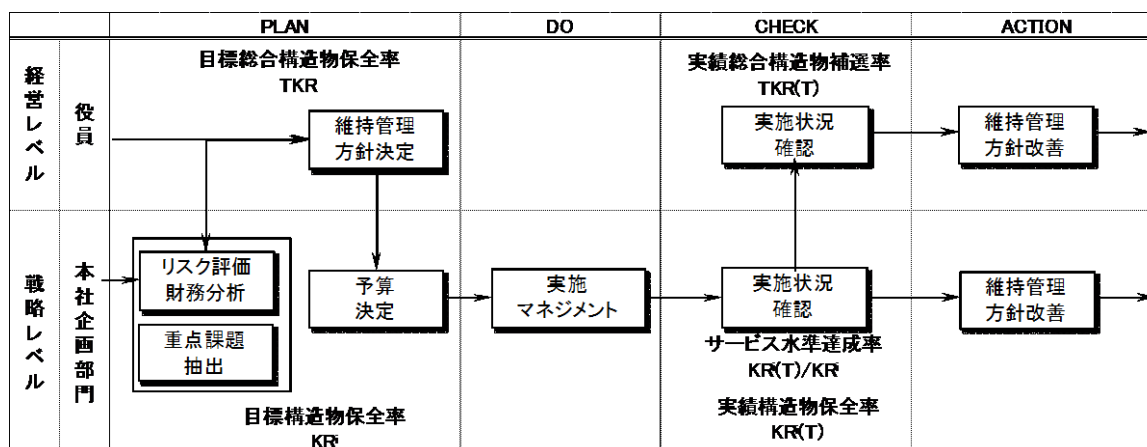


図5-3 ロジックモデルによる維持管理業務（経営マネジメント）

べき目標構造物保全率 KR^i を達成できるように、リスク評価と財務分析を行う。複数の維持管理シナリオをリスク評価、財務分析結果を経営レベルに報告する。これと並行して、相対評価によって抽出した早期劣化グループに対して、点検履歴や写真等を参考にしながら、真に早期劣化となっている箇所と原因、対策について検討を行うとともに、この結果を経営レベルに報告する。経営レベルでの方針決定を受けて、次期の維持管理予算を決定し、実施マネジメントへ移行する。

一方、経営レベルでは戦略レベルから提供された維持管理計画の複数のシナリオを吟味し、最適と考えられるシナリオを次期の維持管理方針として採用し、決定する。このとき、目標総合構造物保全率は TKR となる。

b) 実施段階

戦略レベル、経営レベルともに、具体的な取り組み事項はないと考えられるが、戦略レベルは、維持修繕レベルの取り組みとして毎年の予算配分を決定し、維持管理を実行する。

c) 評価段階

戦略レベルでは、出先部門毎に実績構造物保全率 $KR^i(T)$ と目標構造物保全率 KR^i からサービス水準達成率 $SR^i(T)$ を算出するとともに、経営レベルでは、実績総合構造物保全率 $TKR(T)$ と目標総合構造物保全率 TKR から、維持管理の実施状況を確認する。

d) 検証段階

戦略レベルでは、サービス水準達成率 $SR^i(T)$ の達成状況や、総合構造物保全率、構造物保全率等の指標から、次期の改善点を抽出するとともに、経営レベルでは、総合構造物保全率の達成状況から、次期維持管理方針を策定する上での改善点を抽出する。

5.2.3 リスク評価の基づく財務分析

a) リスク評価手法

阪神高速道路株式会社は想定される収入と支出から償還期限である2050年までのキャッシュフローを予測し、この予測に基づいて機構との協定を締結し、貸付料等を決定している[5]。また、H-BMSでは点検結果から推計した劣化予測に基づいて将来時点で必要となる費用を計算できる。この費用を将来のキャッシュフローに置き換えることによって、償還の可否や当初計画の妥当性を検証することができる。

経営マネジメントではH-BMSによる費用予測に基づいた財務分析を行い[6]–[7]、その結果を経営レベルに提示することによって、機構との協定の見直しや今後の経営方針等の判断に活用することを目指す。将来は不確実であるため必ずリスクが存在する。そのため経営レベルでは、設定した目標をどの程度の信頼度で達成するかを判断する必要がある。一般に信頼度を上げると支出が増え経営を圧迫する。

一方、信頼度を下げると目標を達成できなくなるリスクが増大する。このように信頼度と費用はトレードオフの関係にあるため、経営レベルではリスク分析を通じて保有するリスクの程度を判断する必要がある。本節では、試行を通じて劣化の不確実性に伴うリスク分析の手法を構築する。

阪神高速道路株式会社は2050年に償還を完了しなければならない。しかし、機構との協定では償還時点における構造物の状態が定められていない。ここでは仮に償還期限時点における構造物の状態を2008年時点の水準に維持することを目標とする。また、構造物の状態は構造物保全率によって評価する。

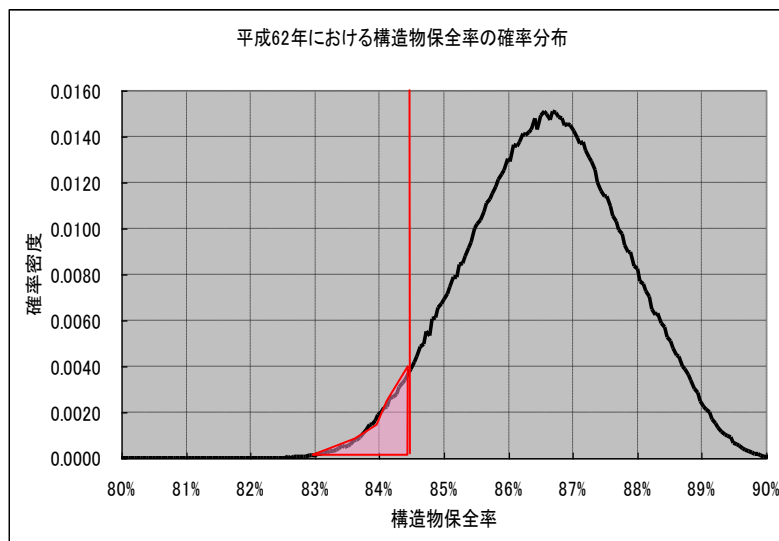
リスク分析では、戦略レベルにおいてこのようなリスク分析を実施して経営レベルに提示する。経営レベルは提示された分析結果から保有するリスクを判断する。このようなリスク分析を種々の不確実性に対して実施することで、内在するリスクを明確にすることができる。

リスク評価の方法として、VaR（バリュー・アット・リスク）による評価を試みる。一般的に、VaR指標は「リスクの管理手法の1つで、現在保有している資産が、一定の期間と信頼区間のもと、予想と反対の方向へ動いた場合に、絶対金額としてどの程度損失が出るかを統計的に算出する指標」と定義される。都市高速道路の場合には、負債の返済期限が設定され、かつ機構との協定によって、維持管理費用が決められる。従って、金額で、ある発生確率の損失を評価することが困難である。ある一定の維持管理費用において、所定の管理水準をどの程度の確率で維持できるかを算出することになる。

図5-4は阪神高速道路が管理する高架橋のある部材に着目し、ある補修シナリオに基づいた償還期限の2050年における構造物保全率の確率分布を示す。a)は確率密度を示し、b)累積確率を示す。VaRが5%となるのは図5-4b)の矢印の線である。この線より下側の領域は、リスクとして考慮されていない領域になる。図5-4a)の例では、VaRが5%となるのは構造物保全率が約84.5%と判断することができる。このVaRの線が予定の管理水準以上になる維持管理費の推計を行う。VaRをいくらにするかについては、管理者が状況に応じて設定するものと考えられるが、一般的には5%でリスク評価が行われるこ

とが多い。維持管理費の推計にあたっては、モンテカルロシミュレーションによって、償還期限である2050年までの将来予測を行う。複数の補修シナリオ(例えば、複数の予算制約を設けることが考えられる)について、将来予測を行い、年次毎の管理指標（構造物保全率）の確率分布を計算する。この計算結果に基づき、VaR評価を実施し、補修予算額と劣化リスクの整理を実施する。

a) 確率密度



b) 累積確率

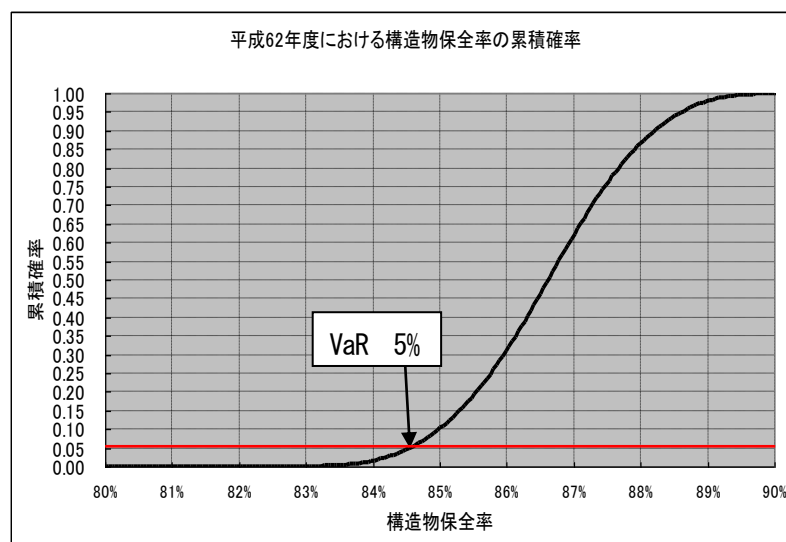


図5-4 構造物保全率分布の確率分布イメージ

b) 財務分析手法

維持管理費は会計上の仕訳として、資産形成に寄与する「資本的支出」と、資産形成には寄与しないが、費用として発生する「収益的費用」に分類することができる。都市高速道路の維持管理を実施するにあたっては、「収益的支出」に該当する補修については、通行料金収入から調達することが可能である

が、「資本的支出」は通行料金からの調達が可能であり、別途借入れる等の方法で自主調達しなければならない。新たに発生した借金は期末に一括して機構に引き渡されるため、機構の債務が増加する。従って、「収益的支出」、「資本的支出」が今後どのように推移するかを把握することは財務上非常に重要である。本研究における財務分析は、この2種類の費用の長期的推移過程を追跡することを目的とする。

c) リスク評価

1) 想定シナリオ

本研究では、阪神高速道路が管理する約234kmの高架橋を対象とする。まず保全情報管理システムに収録されている定期点検データを用いて、構造物の劣化予測を行う。次に、将来に発生する維持管理費用予測を行い、その結果を用いて財務分析を実施する。将来予測については、構造物の劣化過程に不確実性が存在するものとして、確率モデルによる劣化予測モデルを用いる。モンテカルロシミュレーションにより、2009年から2050年までの維持管理費を推計する。工種毎に毎年の予算制約額を設定する。予算制約下で維持管理費を推計し、償還期限の2050年に所定の管理水準を90%、95%、90%の確率で実現できる費用を試算する。

2) 計算条件

ここでは、H-BMS対象工種（舗装、塗装、伸縮継手、床版、コンクリート構造物、鋼構造物、支承）とし、対象とするリスクとして、構造物の劣化の不確実性をリスクと考えるとともに、確率推移行列を劣化モデルとし、構造要因毎に第3章で述べた相対評価を実施する。相対評価の結果より劣化が早い上位5%を「早期劣化グループ」、それ以外を「標準劣化グループ」に分類後、グループ毎に劣化モデルを作成する。図5-5は塗装を事例に「早期劣化グループ」、「標準劣化グループ」として分類後の確率推移行列の計算例を示している。

a) 早期劣化グループ						b) 標準劣化グループ					
	OK	C	B	A	S		OK	C	B	A	S
OK	0.4549	0.3626	0.1559	0.0266	0	OK	0.9653	0.0331	0.0016	3E-05	0
C	0	0.4658	0.4224	0.1118	0	C	0	0.9078	0.0898	0.0024	0
B	0	0	0.6502	0.3498	0	B	0	0	0.949	0.051	0
A	0	0	0	0.6502	0.3498	A	0	0	0	0.949	0.051
S	0	0	0	0	1	S	0	0	0	0	1

図5-5 確率推移行列（塗装）

また、管理指標としては、構造物保全率(5.2.2)、舗装保全率(5.2.3)を管理水準とする。

さらに、補修の実施時期については、本来であればLCCを最小にする補修時期と補修工法を与える最適管理水準で補修すべきである。LCCによる最適管理水準を算出した場合、部材によっては現在補修対象ではないBランク判定が最適管理水準のものもある。

しかしながら、現状では、補修が必要と判断されるAランク、Sランクで補修が行われ、Bランクで補修が実施されることは少ない。

また、将来予測計算において、予算制約を考慮した場合には、健全度が低い箇所が優先的に補修されるため、最適管理水準での補修は結果的に見送られることになり、最適管理水準が計算上考慮されないことが多い。従って、本研究では、予算制約を考慮した将来予測を行うことを前程として、最適管理水準での補修実施ではなく、現況の維持管理業務での補修実施時期であるAランク、Sランクで補修を実施することとする。

次に、補修方法はH-BMS対象工種毎に設定する。舗装は打ち替え補修を基本とする。ポットホール等の維持費用は、舗装の健全度に応じて設定した。塗装については塗替え塗装を考慮する。コンクリート構造物はひび割れ注入、表面防護等一般的な補修方法を設定した。試算では、同じ補修を繰り返すことにより、半永久的に工種毎の管理水準を維持できると仮定する。

本研究では、H-BMS対象工種毎に予算制約を与えることとする。予算は0.1億円/年きざみで設定し、所定の管理水準を維持できる予算制約を必要予算と考える。予測計算におけるある年次にAランク、Sランクを補修してもなお、予算が余っている場合には、予算を使い切らないこととする。また、舗装の予算については打ち替え等の修繕に予算制約をかけることとし、維持費用は予算制約毎に算出される舗装の健全度に応じて発生することとした。

3) 計算結果

リスク評価に基づく将来予測結果を表5-2、表5-3に示す。表5-2はVaRが5%、つまり95%の確率で所定の管理水準を維持することができる場合の毎年の予算枠と、推計された毎年の補修費用を示す。同様に表5-3はVaRが1%、表5-4はVaRが10%の結果を示す。VaRが5%の表5-2のケースに限って、図5-6に費用の推移を示す。表5-2から表5-4の「最新点検時管理水準」は直近の点検結果に基づく管理水準の値を示す。「予算制約額」は2009年から2050年の42年間で、1年間に使える予算の上限を示し、「平均支出額」は42年間で実際に支出した費用の年平均額を示す。表の中央のセルには、上記の費用を支出した場合の2050年の債務返済期限における予測管理水準を示す。

劣化リスクを考慮しているため、表5-2の場合には、95%の確率で実現する管理水準を示している。

図5-6をみると、毎年51.8億円の支出がなされている。2014年付近で支出額の落ち込みがみられるが、これは塗装の支出額の落ち込みによるものである。塗装は2009年から2014年の間で劣化した箇所を補修してしまい、2014年頃には予算制約額上限まで費用の支出がないからである。その後は次第にAランク判定箇所が増加するため、補修費用も増加する。劣化リスクを厳格に評価してVaRを1%とした場合、必要な費用は5%とした時より、0.1億円/年、10%としたときより0.3億円/年多くなる。安全性を最優先に考え、通常の維持管理の中で劣化リスクを1%に抑えたいという立場にたてば、51.9億円/年が必要である。

劣化リスクを5%まで許せば、51.6億円/年の費用を見込めばよい。試算によると、リスクの変動が維持管理費用に与える影響が小さい結果となった。これは、補修により機能がOKまで回復し、同じ補修を繰り返せば管理水準を半永久的に維持できると仮定したために、劣化リスクが限定的になったと考えられる。

表5-2 VaRが5%の場合の推計結果

工種	最新点検時 管理水準	2050年の予測 管理水準 (95%信頼域)	予算制約額 (億円/年)	平均支出額 (億円/年)
舗装	99.49%	100.00%	修繕予算 4.50	修繕費 4.33 維持費 3.42
塗装	98.26%	98.40%	17.00	14.24
伸縮継手	94.73%	96.00%	19.50	19.48
Co桁	87.49%	90.30%	4.00	3.96
鋼桁	98.57%	99.50%	0.90	0.82
Co脚	95.82%	99.80%	3.50	3.41
床版	99.72%	100.00%	0.40	0.31
支承	96.72%	98.70%	2.00	1.85

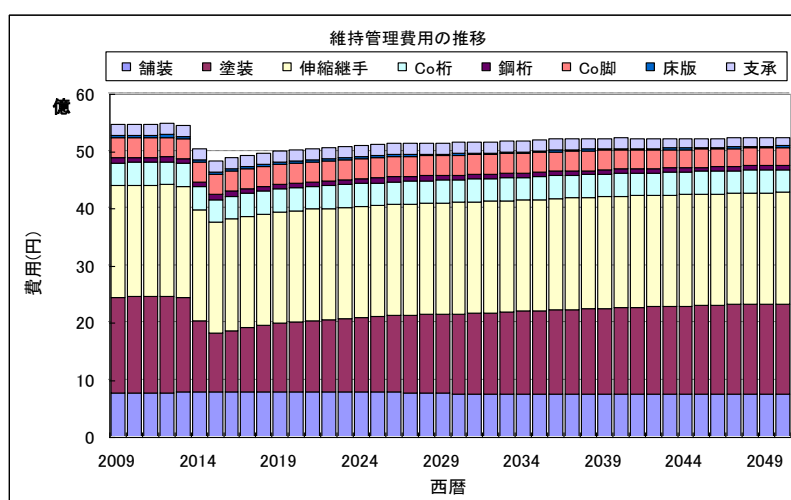


図5-6 VaRが5%の場合の費用の推移

表5-3 VaRが1%の場合の推計結果

工種	最新点検時 管理水準	2050年の予測 管理水準 (99%信頼域)	予算制約額 (億円/年)	平均支出額 (億円/年)
舗装	99.49%	100.00%	修繕予算 4.50	修繕費 4.33 維持費 3.42
塗装	98.26%	98.50%	18.80	14.32
伸縮継手	94.73%	95.60%	19.50	19.48
Co桁	87.49%	88.90%	4.00	3.96
鋼桁	98.57%	99.50%	0.90	0.82
Co脚	95.82%	99.60%	3.50	3.41
床版	99.72%	100.00%	0.40	0.31
支承	96.72%	98.00%	2.00	1.85

表5-4 VaRが10%の場合の推計結果

工種	最新点検時 管理水準	2050年の予測 管理水準 (90%信頼域)	予算制約額 (億円/年)	平均支出額 (億円/年)
舗装	99.49%	100.00%	修繕予算 4.50	修繕費 4.33 維持費 3.42
塗装	98.26%	98.90%	16.90	14.23
伸縮継手	94.73%	95.80%	19.40	19.38
Co桁	87.49%	88.30%	3.90	3.86
鋼桁	98.57%	99.50%	0.90	0.82
Co脚	95.82%	98.00%	3.40	3.38
床版	99.72%	100.00%	0.40	0.31
支承	96.72%	98.00%	1.90	1.84

次に、図5-7と図5-8は、図5-6で示した費用を収益的支出である「維持管理費」と資本的支出である「修繕費」の費用の推移を示す。計算開始からしばらくは、仕様の変更を伴う補修が多く、資本的費用である「修繕費」に仕訳されるために、修繕費が多く支出される。時間の経過とともに、1回目の補修数が減少するために、「修繕費」は時間が経つにつれて減少していく。

一方、「維持管理費」は当初支出額が少ないが、時間の経過とともに過去に仕様の変更を伴う保守が完了し、2回目以降の補修が実施されるため、増加していく。

以上のことから、2009年からしばらくは「修繕費」の支出が多いために、自主調達による借入れが増加することが予想されるが、時間の経過とともに次第に減少していく。また、「維持管理費」は「修繕費」とは逆に、時間の経過とともに増加する。これは、2回目以降の補修が、1回目と同じ仕様の補修を実施することから、収益的支出として仕分けされるからである。「維持管理費」は通行料金を原資とするため、「維持管理費」の増加が他の事業費用に影響を与える可能性が考えられる。

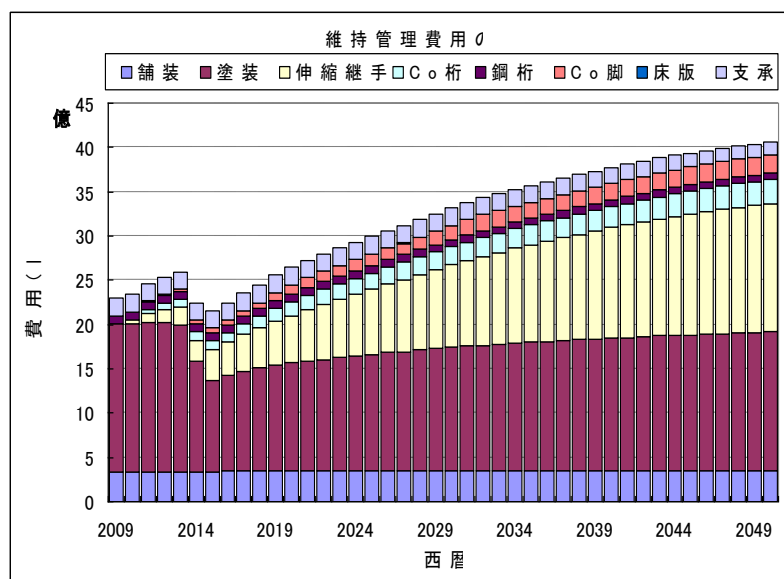


図5-7 維持管理費(収益的支出)の推移

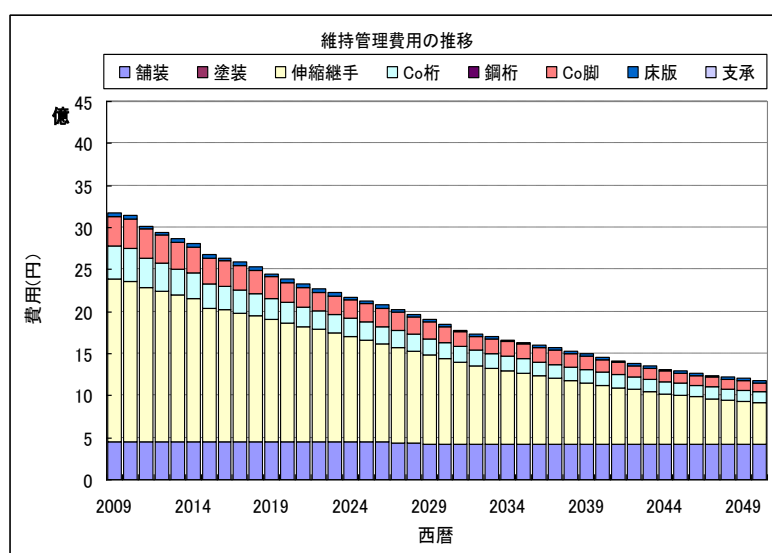


図5-8 修繕費(資本的支出)の推移

5.2.4 実施マネジメント

実施マネジメントでは、毎年の予算枠と確保すべき管理水準が与条件として与えられ、この中で、より効果的な補修計画が策定されることとなる。補修箇所を選定にあたっては、直近の損傷データを地図表示した損傷データマップを参考として行うとともに、補修予定箇所から概算費用を算出して戦略レベルに予算要求する。戦略レベルは、維持修繕レベルからの要求と経営レベルからの決定を踏まえて、予算の調整と決定を行う。毎年与えられた予算の中で補修計画が立てられることから、1年毎のマネジメントサイクルとなる。また、補修対応状況を指標化した実績構造物保全率を評価指標とし、補修後の状況を点検データマップにより視覚化することで、維持修繕レベルにおいて積極的に補修するためのインセンティブを付与することにより、対策実績を評価する業務プロセスを導入する。

図5-9は実施マネジメントにおけるロジックモデルを考慮した業務プロセスの試行例を示す。維持管理方針は上位の経営マネジメントで決定されており、毎年の維持管理予算と確保すべき管理水準は所与と仮定する。

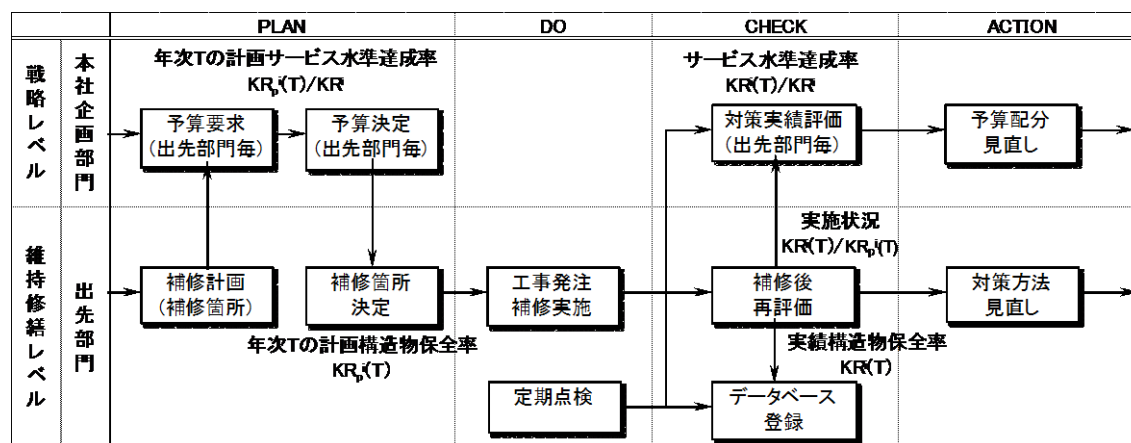


図5-9 ロジックモデルによる維持管理業務（実施マネジメント）

a) 計画段階

維持修繕レベルでは、ある年次 T のある工種 i において、維持修繕レベルである出先部門は前年度までで得られた直近の点検データに基づき、最新の構造物保全率 $KR^i(T-1)$ を算出する。維持管理方針で維持すべき構造物保全率 KR^i を達成できるように、補修計画を策定し、戦略レベルである本社企画部門に予算要求を行う。最終的には本社企画部門からの配分予算に従って、最終的な補修計画を策定する。改めて、計画構造物保全率 $KRp^i(T)$ を算出する。

一方、戦略レベルでは、維持管理方針に従い、管理部毎の予算配分を決める。その際、出先部門からの予算要求を参考にする。予算配分が完了した段階で、予想されるサービス水準達成率は $KRp^i(T)/KR^i$ となる。

b) 計画段階

維持修繕レベルでは、出先部門において工事発注を行い、補修工事を実施する。また、戦略レベルでは、出先部門の予算の執行状況を把握しておく。

c) 評価段階

維持修繕レベルでは、補修工事が完了するため、工事完了後の実績構造物保全率 $KR^i(T)$ を算出するとともに、補修の実施状況を参考にして、実施状況の整理を行うとともに、戦略レベルでは、出先部門毎に実績構造物保全率 $KR^i(T)$ と目標構造物保全率 KR^i からサービス水準達成率 $SR^i(T)$ を算出する。同時に実施状況 $KR^i(T)/KR_p^i(T)$ が算出される。

d) 検証段階

維持修繕レベルでは、補修計画に対する実施状況が 100% に満たない場合には、達成できなかった原因を追求し、改善策を講じるとともに、戦略レベルでは、出先部門毎のサービス水準達成率 $KRp^i(T)/KR^i$ を踏まえて、次年度以降の予算配分方法について改善を行い、全体として維持すべき構造物保全率 KR^i が達成できるよう調整を行う。

5.2.5 ロジックモデルの修正

第3章で阪神高速道路の維持管理業務に係るロジックモデルを整理した。その後第4章で、相対評価による重点課題の抽出が、維持管理業務における重要な政策課題であることがわかった。従って、相対評価による重点課題の抽出が、維持管理のロジックモデルの樹形図に追加される必要がある。

相対評価による重点課題の抽出は、本体構造物については、構造物保全率と同様に取扱うとともに、舗装については舗装保全率と同様の扱いと考えることができる。本体構造物、舗装のそれぞれについて、重点課題の抽出にかかるロジックモデルの樹形図を図5-10、図5-11に示す。

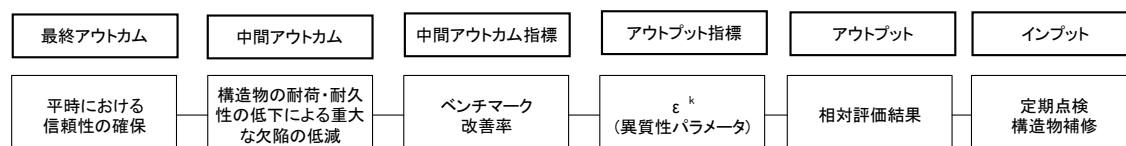


図5-10 重点課題に対するロジックモデル樹形図(本体構造物)

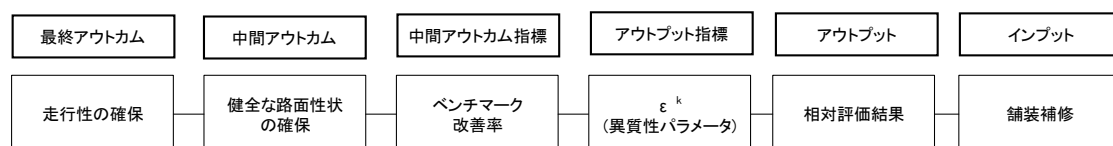


図5-11 重点課題に対するロジックモデル樹形図(舗装)

5.3 結言

本章では、阪神高速道路を事例として、都市高速道路のアセットマネジメントのうち、リスク評価に基づく財務分析について検討を行った。検討に際して、内部統制とロジックモデルの枠組みを考慮した業務プロセスを整理し、構造物保全率に係る指標を例に業務におけるロジックモデルの評価指標の流れを整理した。そして、H-BMSが業務プロセスの中でどのような位置づけがされ、どのような役割を果たすべきかを議論した。さらに、リスク評価を行い、将来の維持管理費用を推計し、財務分析を実施した。その結果、劣化リスクと財務分析結果を関連付けることが可能になった。

試算からは、劣化リスクは道路会社全体の各年度における経営リスクに大きな影響を与えていない結果となった。しかし、維持管理業務が適切に執行されるかどうかは、道路会社の長期的な経営リスクに多大な影響を及ぼす。また、維持管理業務において、維持管理シナリオと経営リスクが対応づけられれば、道路会社の経営者層が経営方針を策定するための有益な情報となる。

特に、採用する維持管理シナリオがどの程度のリスクを有しているかを定量的に把握することが可能となる。本研究で実施したリスク評価と財務分析では、いくつかの前提条件を仮定している。今後、リスク評価と財務分析の精度を向上させるためには、解決すべき課題が残っており、以下に整理する。

まず、1) 試算では高架橋の維持管理に割り当てられた予算は全て補修に使用できると仮定した。実際の維持管理では、予定していた補修以外に、突発的な補修が発生する等予定外の支出があり、割り当てられた予算全てを補修に使えない可能性が考えられる。その場合、本試算で設定した費用では所定の管理水準を維持できない可能性がある。2) リスク評価や財務分析を実施するにあたって、多くの前提条件を設定している。リスク評価を行う際にどの条件が結果に与える影響が大きいかを検討するために、パラメータ解析による感度分析を実施する必要がある。

また、3) 本研究のリスク評価に基づいた将来予測の考え方は、管理水準を維持するために必要な費用を算出している。実際に維持管理を実施し、その実施状況を適切に管理していくためには管理会計の構築が必要と考えられる。維持管理に係る会計手法には、資産の減耗の考え方によって、いくつかの会計手法[8]–[9]が考えられるが、本研究の計算方法は「繰延維持補修会計」原則に基づいた管理会計を構築することが可能となる。

4) 相対評価による重点課題の抽出が阪神高速道路の維持管理業務において重要な政策となることから、相対評価に関するロジックモデルの樹形図を整理した。現段階では、概念上の整理に留まっているが、今後は実際の業務を通して、このロジックモデルを試行し、実業務の中で機能させるモデルとする必要がある。

5) 本研究で示したロジックモデルは阪神高速道路の維持管理に係る業務を体系立てたものではあるが、指標の中には実際の数値を設定できていないものも存在する。また、数値を設定できた指標についても、

運用の中でその妥当性を検証できているわけではない。実務において、ロジックモデルの妥当性を検証するためには、ロジックモデルの指標に関係のあるデータを管理するためのデータベースが必要である。

第3章で述べたとおり、阪神高速道路株式会社には保全情報管理システムというデータベースがあり、維持管理業務に関係するデータを管理している。H-BMSはこのデータベースで管理されているデータに基づいたシステムであり、維持管理業務において運用がなされ、妥当性の検証が行えるようになっている。ロジックモデルについてもデータベースを軸としたシステム化を図り、今後の運用の中で妥当性を検証し、精度向上につなげていく必要がある。ロジックモデルをシステム化することができれば、H-BMSと併せて、阪神高速道路株式会社の維持管理業務の情報を、会社全体で共有することができるようになり、内部統制の枠組みを踏まえたリスクマネジメントの仕組みを構築していくことにつながる。

最後に、本研究で示した数値計算事例は多くの仮定に基づいた試算であり、本数値計算事例は都市高速道路のアセットマネジメントを実施するうえで、1つの流れを示すためのものであることを断わっておく。

参考文献

- [1] 吉川吉衛：企業リスクマネジメント，中央経済社，2007.
- [2] リスク管理・内部統制に関する研究会：リスク新時代の内部統制～リスクマネジメントと一体となつて機能する内部統制の指針～，2003.
- [3] 坂井康人，上塚晴彦，小林潔司：ロジックモデル（HELM）に基づく高速道路維持管理業務のリスク適正化，建設マネジメント研究論文集，土木学会，Vol.14，pp.125-134，2007.
- [4] 小濱健吾，岡田貢一，貝戸清之，小林潔司：劣化ハザード率評価とベンチマーキング，土木学会論文集 A，Vol.64，No. 4，pp.857-874，2008.
- [5] 高速道路機構ファクトブック，2008.
- [6] 坂井康人，荒川貴之，井上裕司，小林潔司：阪神高速道路橋梁マネジメントシステムの開発，土木情報利用技術論文集，土木学会，Vol.17，pp.63-70，2008.
- [7] 坂井康人，井上裕司，小林潔司：都市高速道路の舗装修繕における同時施工の有効性検証，建設マネジメント研究論文集，土木学会，Vol.15，pp.159-168，2008.
- [8] 慈道充，江尻良，織田澤利守，小林潔司：道路舗装管理会計アプリケーション，土木情報利用技術論文集，土木学会，Vol.13，pp.125-135，2004.
- [9] 江尻良，西口志浩，小林潔司：インフラストラクチャ会計の課題と展望，土木学会論文集，No.770/VI-64，pp.15-32，2004.

第6章

結論

アセットマネジメントは、狭義な視点でみると現場における効率的な維持、修繕、補修計画の策定、実践から、広義な視点みると財政当局からいかに修繕予算を確保していくか、さらにもっと広げれば、様々なステークホルダーに対して維持管理の重要性をどのように認識してもらうか。そのようなことも含めた非常に幅広いマネジメントである。アセットマネジメントを体系化していくには単年度における補修計画、補修工事の実施から、中長期的な投資計画、構造物の機能水準の維持、予防保全等の補修戦略をマネジメントすることにより、ステークホルダーへの説明責任を果たしていくことになる。言い換えれば、アセットマネジメントは単に現場だけのサイクルではなく、インフラを主に行っている組織全体のマネジメントと連動しているということである。

アセットマネジメントを体系化するにあたり、支援システムの構築が必要となり、膨大な道路資産のデータ、過去の目視点検データや補修履歴に関するデータが最も重要であり、根幹となるべきものである。本研究では、都市高速道路の経営マネジメント手法として、阪神高速道路株式会社を例として、阪神高速ロジックモデル（HELM : Hanshin Expressway Logic Model）を構築し、政策評価の方法論について提案するとともに、阪神高速道路ブリッジマネジメントシステム（H-BMS : Hanshin Expressway Bridge Management System）のアプリケーションソフトを予算執行におけるマネジメント手法として提案した。予算執行におけるマネジメントについては、リスク評価に基づく財務分析について検討を行った。

また、これら検討に際しては、内部統制の枠組みを考慮した業務プロセスを整理し、H-BMSが業務プロセスの中でどのような位置づけがされ、どのような役割を果たすべきかを検討した。そして、リスク評価を行い、将来の維持管理費用を推計し、財務分析を実施した。その結果、劣化リスクと財務分析結果を関連付けることが可能になった。

本論文における結論と今後に残された課題について以下に整理する。

第2章では、国、地方公共団体等、行政における目標管理の事例として“New Public Management”理論に基づき、都市高速道路における経営目標管理と経営マネジメントシステムについて提案を行った。

都市高速における経営マネジメントシステムには、予算執行のマネジメントと政策評価のマネジメン

トの2つのマネジメントサイクルが存在し、内部統制の枠組みの中で実践することにより、構造物の機能水準を維持するとともに、適正なサービスレベルを決定し、ステークホルダーへの説明責任を果たしていくことになる。

予算執行のマネジメントサイクルは予算レベル、戦略レベル、維持修繕レベルの階層的なマネジメントサイクルに基づき PLAN-DO-SEE-ACTION を実践する。具体的には、維持修繕レベルとは、単年度の補修計画、補修工事の実施であり、1年のサイクルで非常に早く回っている。予算が決まり、その予算のもとで、どこを補修すべきか決定し、実際に補修工事を実行するシステムである。戦略レベルとは、点検データに基づき今後5年程度の補修計画、予算確保に関する検討を行い、計画を策定する。さらに予算レベルとは、長期的に予防保全等の補修戦略を策定し、構造物の機能水準を維持することである。

政策評価のマネジメントサイクルは、ロジックモデルに基づいてマネジメントを実践していき、中長期、短期レベルでロジックモデルそのものを評価検証し、必要に応じて見直しを行っていくことである。

都市高速道路の維持管理については、従来の橋梁やトンネル等の構造物の維持管理に加え、道路利用者の走行時路面の安全性を確保するための路面清掃や路上点検、交通情報を持続的に提供するための情報システムの保守点検、道路利用者にパーキング施設等を快適に使用していただくための施設清掃業務等、多様な業務活動で構成される。道路管理者には、道路を常時良好な状態に保つ義務がある一方で、同時に維持管理業務の効率化を達成することが求められている。

ロジックモデルについては、維持管理業務のうち、LCC等による工学的評価が困難な「清掃」、「保守点検」業務を対象とするとともに、土木、設備本体の構造物補修をも含む総合的な内容となっており、各々の活動の実施が期待する成果へ至る過程を把握し、定量的な指標、管理水準を設定することで、個々の業務の業績達成度を評価し、最適な規模（頻度、体制）を提示するツールとして適用する。各管理項目について、インプット-アウトプット-中間アウトカム-最終アウトカムとして各々指標化を行い、ツリー間における因果関係を明確にした。このことにより、何か事象が発生したときの原因がどこにあるのか、といったことが明確になる。定量化した各指標について、3種類の管理水準、1)リスク評価によりアウトカムのある目標を達成するように定めたもの、2)業務のパフォーマンス状態を示すためにベンチマーク的に定めたもの、3)業務体制の是非を評価するために事象を処理するための時間を定めたもの（MTTR：Mean Time To Repair）を設定した。

ロジックモデルは阪神高速道路株式会社の維持管理業務を体系化したものであり、設定している指標也多岐にわたる。指標の数が多くなっても、業務における指標の流れは同じになるため、個々の指標を評価しながら業務を進めることになる。

第3章では、企業における内部統制論とリスクマネジメントの必要性について述べるとともに、第2章において構築したロジックモデルで定義づけした各指標のうち、リスク評価が可能な指標として、インプットとして日常点検（路上点検、路下点検）に着目し、リスクマネジメントについて検討を行った。

リスク水準が高い管理項目に関しては、メンテナンスのレベルを上げてリスク軽減を図るとともに、リスク水準が必要以上に低いものについては、管理水準を引き下げることにより、コストを縮減する。

それにより、管理施設全体のリスクをバランスよく抑制しつつコスト縮減を達成することができる。

道路施設の不具合（路面の穴ぼこ、落下物、土砂等）の発生状況は、路線によって異なる。点検頻度を多くすれば、不具合を放置する時間が小さくなるので、道路利用者がその不具合に遭遇する確率を減らすことができる。しかし、路線毎に交通量が異なるため、道路利用者が不具合に遭遇する確率をバランスよく抑制するためには、交通量の多い路線では点検頻度を多くするとともに、交通量が少ない路線では点検頻度を低減することも考慮する必要がある。そこで、不具合に遭遇する確率と交通量の大きさの積をリスクと定義するとともに、路線毎に異なるリスクをバランスよく目標とする管理水準に近づけることができれば、路線網全体におけるリスク水準の適正化を図ることが可能となる。さらに、維持管理業務におけるリスク管理目標（アウトカム）、リスク管理水準（アウトプット）、および維持管理業務の内容（インプット）の関係を、ロジックモデルを用いて分析することにより、維持管理業務全体を対象としたリスク管理水準の適正化、サービス水準の内容を総合的に検討することが可能となる。

ここでは、その結果、路上点検において発見される穴ぼこ滞留量について、穴ぼこ滞留リスクの適正化、つまり、点検の重点化を図り各路線のリスクの平準化を行うことにより、総リスクが減少し、総コストも縮減する結果を得ることができた。また、路下点検についても、点検頻度と路下損傷リスクの関係を分析するとともに、路下損傷リスクが管理水準の範囲に収まるか否かを検討を行い、リスクの適正化を試みることにより、路線網全体の路下損傷リスクが減少し、総コストも縮減する結果となった。

この方法論は、路上点検、路下点検のみならず、他の土木施設への点検頻度の検証において幅広く適用が可能である。

第4章では**第2章**で構築したロジックモデルで定義づけした各指標のうち、本体構造物に関連した構造物保全率、舗装保全率に着目し、阪神高速道路株式会社における橋梁マネジメントシステムであるH-BMSの劣化予測手法について検討を行った。

具体的には、構造物の不確実性をリスクとして考え、劣化リスクと維持管理費の関係について、目視点検データに基づき多段階指数ハザードモデルを用いてマルコフ推移確率を推計することにより、現実の劣化過程に関する情報を劣化予測に基づき、都市高速道路における大規模補修工事等の有効性について確認を行った。

また、本体構造物については、構造物が完成してからの経過年数による劣化速度の変化に着目し、ワイブルハザードモデルを用いて劣化の時間依存性について検討を行うとともに、確定モデルと確率モデルの整理を行った。結果として、健全度の低いデータが十分蓄積されていない場合、劣化速度の時間依存性は明確に確認できないことが判明した。このことは、都市高速道路のように構造物を非常に高い水

準で維持しているような本体構造物の劣化予測に際しては、損傷が多数発生する摩耗期に至るデータがないことから、ワイブルハザード関数を用いることは適切でないといえる。

さらに、土木施設の劣化過程は、構造物が置かれている環境条件、施工時における品質等により、異質性があることから、ワイブル関数に基づく予測検討に加えて、この異質性パラメータを用いた混合マルコフ劣化モデルにより、H-BMS 対象工種（舗装、塗装、伸縮継手、床版、コンクリート構造物、鋼構造物、支承）における劣化速度を相対評価を行い、構造物毎の劣化のばらつきを評価するとともに早期劣化グループの抽出を行った。抽出された早期劣化箇所は会社としての重点施策箇所であり、経営者層から担当者層に至るまでのすべてに情報共有を行う必要がある。この方法論は、単年度、中長期的な維持管理計画を立案するうえで、非常に有効なものといえよう。

最後に、第5章では第2章から第4章までの成果を踏まえ、都市高速道路の業務プロセスとロジックモデルの関係を整理し、ロジックモデル並びにH-BMSを用いた他を用いた戦略的な維持管理のための方法論を提案した。この中で、H-BMSは経営マネジメント、実施マネジメントを繋ぐ支援システムと位置づけられる。また、計画的な予防保全への転換を図るために、既存システムを活用した業務プロセスについて検討した。この中で阪神高速の組織を経営レベル、戦略レベル、維持修繕レベルの3つの階層に分類し、各階層がコントロール・モニタリングによって互いに情報を共有しながら、PDCAサイクルによって改善する仕組みを立案した。今後、業務プロセスに関する項目の検討を進めながら、立案した業務プロセスの実務への適用を進めていく予定である。

本研究で開発した、維持管理ロジックモデル、橋梁マネジメントシステムの有用性をさらに高めるためにいくつかの課題が残されている。

第1に、マネジメントサイクルを重ね、顧客満足度調査を行うことにより各指標値の評価、検証を行い必要に応じて見直しする。また、指標値を設けたもののデータ蓄積に時間がかかるものも多いことから蓄積手法についてさらに検討する必要がある。ロジックモデルは企業のリスクマネジメントを体系化したものであり、現在の技術でできることとできないことを明確にするための有効な手段となる。また、アウトプットやアウトカム指標は現場にインセンティブを与えるものでなければならず、ロジックモデルはこのような指標の見直し等の政策評価の役割も果たす。

第2に、構築したロジックモデルをシステム化することにより、BMS と併せて、維持管理業務の情報を、会社全体で共有することができるようになり、内部統制の枠組みを踏まえたリスクマネジメントの仕組みを構築していく必要がある。

第3に、マネジメントサイクルを重ねることにより点検データを蓄積し、主観的に与えた劣化確率を更新していくことが可能となる。点検データを分析するにあたり、点検は実施しているものの当該損傷箇所の補修が実施されたか不明な場合が多い。また、劣化予測の考え方としては補修履歴データがあればOKに回復する考え方となっており、現実的でない。従って、補修後の再評価手法や点検、補修情報

を確実に記録する仕組みを構築する必要があることにより、確率劣化モデルの信頼性をさらに向上させる手段として大きく期待できる。

第4に、目視点検によって観測された実績データには不確実な点検誤差を含んでいる。目視点検による点検データは、検査の主観的な判断に頼るところも多く、検査された健全度に判定誤差が含まれることは避けられない。また、5～8年の点検間隔の間に損傷数が増大することも想定できる。最近では各種センサーを用いたモニタリング技術や定量的診断に関する研究が進んでおり、これらのモニタリング技術による連続データを用いて目視点検データを補完することにより、次世代のアセットマネジメントの開発が期待される。

最後に、アセットマネジメントは、その研究や実施での適用が普及しているものの、その効果が明らかになるまでは若干の時間を要するだろう。本研究で提案した政策評価の有用性を高め都市高速道路における維持管理の実務に適用し、継続的改善を図っていくことが必要である。

本研究で提案した方法論および今後の継続的な研究成果がわが国におけるインフラの維持管理業務に有効活用され、インフラ資産が次世代に効果的に引き継がれていくことを期待したい。

謝辞

本研究の遂行にあたり、多くの方々にご指導、ご鞭撻を賜りました。ここに心よりの感謝の意を表します。

まず、京都大学 小林潔司教授には、本研究の内容および方針について、終始親切丁寧なご指導、ご鞭撻を賜りました。思い起こせば2006年7月に筆者は阪神高速道路株式会社において、アセットマネジメントを担当することになり、小林潔司教授と出会うとともに、インフラ資産の維持管理にあたっての内部統制、政策評価論、劣化予測手法といったマネジメント論の全般にわたり、筆者をご指導いただくことになりました。その過程でアセットマネジメントに魅了され、学問領域に足を踏み入れていきました。

さらに、筆者が本研究をとりまとめるにあたり、学会発表等様々な機会を与えてくださったことは、筆者にとっての大きな財産となりました。

また、本研究の成果を研究のみならず、筆者の所属する阪神高速道路株式会社の維持管理業務に生かしていくことが重要であると考えた筆者は、経営幹部までの理解が必要であると考え、小林潔司教授に御相談したところ、アセットマネジメントについて阪神高速道路株式会社 田中宰会長、木下博夫社長をはじめとする経営幹部に対する「経営者塾」において講演を行っていただきました。筆者はこの講義に非常に感銘を受けるとともに、この講演を契機に全社的にも政策評価の重要性が改めて認識されました。

ここに、改めて深謝の意を表するとともに、アセットマネジメントにおける更なる研究活動に努めたいと決心する次第であります。

大阪大学 貝戸清之特任講師には、非常に御多忙な中で、劣化予測手法である多段階指数ハザードモデル、さらには土木施設の異質性に着目した混合マルコフハザードモデル等、劣化予測手法に関する最新の知見について様々なアドバイスをいただくとともに、アセットマネジメントの普及について様々な議論をさせていただきました。また、阪神高速道路株式会社の担当社員に対し、点検の重要性、アセットマネジメントの基本概念について理解してもらう目的で講師を気軽に引き受けていただき非常に感謝しています。

京都大学 大津宏康教授には、建設マネジメント勉強会でお会いするたびに筆者の研究状況について

気にかけていただくとともに、研究成果をとりまとめるにあたり適切なご助言並びにご指導をいただき、非常に参考になりました。特に、「学位取得の意義」、「個人の品質評価」、「研究の成果はゴールではなく、通過点の1つであり、新たな研究の出発点である」とのご助言に、筆者は非常に感銘を受けるとともに、今後のアセットマネジメントにおける研究活動に強く影響を受けました。さらに、建設マネジメント勉強会での情報は、筆者が研究成果をとりまとめるにあたり、非常に有益なものでした。また、京都大学 河野広隆教授には、筆者の研究結果に対して、学会発表等も含め、様々なご助言をいただきました。ここに、深く感謝いたします。

本研究は、2002 年から行われている、阪神高速道路株式会社技術審議会道路資産管理システム分科会での審議が論文の根幹を形成しております。審議にあたり、貴重なご指導、ご助言をいただいた関西大学大学院 古田均教授、神戸大学大学院 森川英典教授に、ここに深く感謝いたします。

財団法人阪神高速道路管理技術センター 荒川貴之氏には橋梁マネジメントシステムアプリケーションの開発にあたり、度重なる議論を重ね、短期間の中でシステム設計および開発に携わっていただきました。また、中央復建コンサルタンツ株式会社 井上祐司氏、慈道充氏、株式会社建設技術研究所 上塚晴彦氏には終始、本研究成果をとりまとめるにあたり貴重なご意見とご協力をいただきました。さらに、混合マルコフハザードモデルの適用にあたっては、青木一也氏（パスコ）から多くの示唆を受けました。ここに深く感謝いたします。

一方、アセットマネジメントの基本である点検の実施方法をはじめとして資産データ、点検データ、補修データ等のデータベースへの入力方法等、本研究を行うことにより発見された様々な実務面での課題があり、アセットマネジメントシステムをよりよいものにするために、さらに継続して検討を行う必要があります。

筆者が本研究を始めるきっかけとなったのは、阪神高速道路株式会社がアセットマネジメントの取り組みを全社的な取り組みとして位置づけ、本研究の機会を与えてくださった阪神高速道路株式会社 中林正司執行役員並びに鈴木巖氏、西岡敬治氏、関本宏氏、金治英貞氏には深く感謝いたします。さらには、本研究に多大なご支援をいただいた阪神高速道路株式会社並びに財団法人阪神高速道路管理技術センターの関係者一同に深く感謝いたします。本研究成果は、阪神高速道路株式会社にとって非常に有用なものであることから、日常の維持管理業務に反映させ、更なる向上を図っていくのが今後の重要な課題であり、努力してまいりたい所存であります。

京都大学 松島格也准教授、大西正光助教には、研究の進め方をはじめとして親切丁寧にご指導いた

だき筆者の研究生生活の多くを支えていただきました。心より感謝いたします。

修士課程藤森祐二氏、寺西裕之氏をはじめとする京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻計画マネジメント論研究室の皆様には、筆者を研究室の一員として快く受け入れていただきました。

また、秘書の藤本彩氏には、研究活動生活を支えていただきました。心より感謝いたします。

最後に、常に筆者の研究活動を陰ながら支えてくれた妻と子供たちに感謝の意を表します。

2009年8月

京都にて
坂井 康人