

博士論文

道路トンネル照明施設マネジメントのための
数理的劣化状態予測モデルの活用に関する研究

(Study on Utilization of Mathematical Deterioration Prediction Model
for Asset Management of Road Tunnel Lighting Facilities)

2022年3月

前田 典昭

山口大学大学院創成科学研究科

目次

第1章 序論	1
第1節 研究の目的と対象範囲	1
1. 1 研究の目的	1
1. 2 研究の対象範囲	3
第2節 本論文の構成	4
2. 1 構成内容と構成図	4
参考文献	7
第2章 アセットマネジメントの現状と課題	9
第1節 アセットマネジメントの概要	9
1. 1 アセットマネジメントの目的	9
1. 2 アセットマネジメントの体系と仕組み	12
1. 3 アセットマネジメントの具体と期待効果	13
第2節 アセットマネジメントの現状	17
2. 1 狭義的マネジメントの現状	17
2. 2 広義的マネジメントの現状	19
第3節 アセットマネジメントの課題	21
3. 1 狭義的マネジメントの課題	21
3. 2 広義的マネジメントの課題	27
第4節 まとめ	30
参考文献	31
第3章 狭義的観点からの提案	35
第1節 提案モデル概要	35
1. 1 提案条件	35
1. 2 アセットマネジメント関連の既往研究	36
1. 3 提案モデル概要	38

第2節 対象施設概要	40
2.1 トンネル照明設備の機能と構造	40
第3節 対象施設点検概要	43
3.1 点検種別と対象点検	43
3.2 点検手法	44
3.3 点検判定	45
3.4 点検結果のデータ内容	47
第4節 健全度予測手法	48
4.1 健全度予測モデル	48
4.2 健全度算出手法	50
第5節 健全度算出適用事例	54
5.1 適用対象と適用データ	54
5.2 適用内容	54
5.3 適用結果	58
5.4 結論	61
第6節 効率的補修対応策へのモデル適用事例	62
6.1 適用目的	62
6.2 適用概要	62
6.3 適用条件	63
6.4 補修率を加味した健全度予測	64
6.5 最適補修率の算出	66
6.6 結論	74
第7節 リスクマネジメントに対するモデル適用事例	76
7.1 適用目的とリスク定義	76
7.2 地震リスク関連の既往研究	77
7.3 適用条件	78
7.4 予測手法とマネジメント内容	80
7.5 結論	94
第8節 まとめ	95
参考文献	96

第4章 広義的観点からの提案	101
第1節 提案概要	101
第2節 組織構成とコミュニケーションの役割	103
2.1 組織構成	103
2.2 コミュニケーションの内容	105
2.3 コミュニケーションの重要性	107
第3節 組織におけるイノベーション発現のメカニズム	108
第4節 実効的なコミュニケーションの提案	109
第5節 実効的なコミュニケーションツールの提案	111
第6節 まとめ	119
参考文献	121
第5章 アセットマネジメントの新展開への提案	123
第1節 提案概要	123
第2節 将来対応型マネジメントの概要	124
第3節 狭義的視点からの将来マネジメント像	126
第4節 広義的視点からの将来マネジメント像	130
第5節 まとめ	134
参考文献	135
第6章 結論	136
第1節 本研究のまとめ	136
第2節 将来マネジメントに向けて	139

第 1 章

序 論

第1章 序論

第1節 研究の目的と対象範囲

1. 1 研究の目的

21世紀は、「マネジメントの時代」と言われて久しい。21世紀も四半世紀に差し掛かろうとする今日、各分野での業務管理におけるマネジメントは、必須アイテムとなっている。一般に、マネジメントとは、保有可能となる人的・物的な有形資源と時間的・空間的な無形資源を有効活用し、組織目的に見合った業務の目標に向けて、効率的に管理・運営することである¹⁾。この業務とは、組織運営に不可欠となる技術的な品質管理から経営的な運営管理まで多種多様なものが対象となる。また、業務の内容や運営に応じて、保有資源の内容や組合せ方法も多種多様である。このように、マネジメントは、多様適用性を保有した理論である^{2),3)}。そして、適用の最適妥当性は、経験論を主体とした実証確認から成立している²⁾。また、マネジメントは、内的・外的な環境要因変化の正確認識に連応した変革をすることで効力発現を可能とするものである。そのため、過去の微小変化に連応した検証と修正の結積から、現時の最適マネジメントが確立されている。これは、テイラー、ファヨールから、ムーニー、ライリーを経て、クーンツ、オドンネルに至るマネジメントの基本となる伝統的マネジメント理論史を紐解いても明確である^{2),4)}。つまり、マネジメントは、過去の変化に連応した変革により、現時に至る生態的な進化理論であるため^{2),3)}、毎時における確認・検証・修正が不可欠なものである²⁾。

本論文では、社会資本である社会基盤施設の資産管理を取り扱うものである。これは、社会基盤施設をストック資産として、上記のマネジメント原理を基本に資産管理するもので、アセットマネジメントと呼ばれているものである⁵⁾。一般に、社会資本は、経済学的な公共財である道路・鉄道・港湾・空港等における構造物や付帯物等の事物である公共用資産から構成されている⁶⁾⁻¹¹⁾。この事物のマネジメントは、公共性を有した事務である。一般に、財の生産は、費用負担が必要であり、公共財は、租税による負担を中心に、受益者料金負担も含めた財の生産形態となっている⁶⁾。このため、租税等の負担における基本

原則となる公平性は、公共性事務の必須概念である⁶⁾⁻¹¹⁾。この概念を踏まえると、アセットマネジメントは、公共用資産である構造物や付帯物の事物機能を享受対象者に最大提供するため、事物の状態や費用等を含めて最適管理をすることで、事物の資産価値を最大化する事務的活動である⁵⁾。

21世紀は、少子高齢化や人口減少化が顕著化した社会情勢であり、従来以上に社会資本の財政制約が求められる状況下にある。このような社会状況は、アセットマネジメントの導入や実施を盛んにさせ、内容や手法等で多様性のあるマネジメントが運営されている。このようなマネジメント運営下では、実施しているマネジメントの最適性追求が重要となる。そのためには、現時のマネジメントの確認と検証が不可欠である。その理由は、最適なマネジメントとは、時空間上において、制約的に成立するものであり、不変的・一般的に成立するものではないからである。そして、マネジメントは、時空間等の各環境要因の変化に伴って、変容して進化することで最適を保持するからである。また、マネジメントにおける最適の定義は、実用的価値の評価が根本理論にある⁶⁾。これは、バーナード、サイモンによる組織の体系・意思決定論やアージリス、ハーズバーグによる組織構成体の動機・実行論からも理解できる⁴⁾。これらの理論を踏まえたマネジメントの実用的価値とは、組織と構成個体の行動における実効性観点での評価に起因するものである^{4),6)}。

これらから、本論文では、現時のアセットマネジメント最適性追求として、実効性観点からの課題整理と課題対処における手法提案をするものである。しかし、社会資本は、社会性・全体性・公平性・一般性の多特性を有している。そのため、マネジメントの取り扱いには、同特性を考慮することが必要である⁷⁾⁻¹⁴⁾。これより、アセットマネジメントの最適性追求には、時間空間的な環境要因に対して、差異性を考慮しながらも類似性を優位にした時間変化主体の観点から提案をする¹³⁾⁻¹⁵⁾。また、時間変化は、アセットマネジメント導入・実施時の過去から現在を經由し、現在において想定可能な範囲の将来に至る時間軸上で設定する。これによって、現在から将来にも最適なアセットマネジメントが期待でき、今後の適性検証にも役立つものとなる。このように、本論文は、アセットマネジメントにおける現在の最適性追求から将来の適性までを考慮した手法提案をするものである。そして、アセットマネジメントにおける本提案内容が、今後のマネジメントにおける実効性推進への新展開になることを目的とするものである。

1. 2 研究の対象範囲

社会資本には、道路・鉄道・港湾・空港等の種々分野が存在している。社会資本分野における道路は、維持管理費用や更新費用が大きい社会基盤施設となっている^{16),17)}。一般に、道路は、構造機能となる橋梁やトンネル等の土木構造物（以下、「構造物」と呼ぶ）と安全走行機能を担う照明・情報提供等の施設付帯物（以下、「付帯物」と呼ぶ）や舗装から構成されている。このため、道路のアセットマネジメントは、対象が構造物や付帯物等に多様化し、その構造も複雑化している。これは、マネジメント対象の多様化が汎用性を保有する一方で、マネジメント対象の複雑化が類似性を喪失させている。この点が、マネジメントの導入や実施において、様々な影響を与えている。

このような複雑的な構造は、一般システム論的視点を用いると理解しやすくなる。一般システム論とは、全体系を異なる単純系による組み合わせと考え、任意の単純系をアナロジー（類似性）としながら、他単純系を取り扱うことで、全体系の把握が可能となるものである¹⁸⁾⁻²⁰⁾。更に、その単純系は、多体単純系とすることで、全体系の複雑化を促進することが可能となる。このように、複雑化された全体系の理解には、多体単純系にして取り扱うことが基本プロセスである。一方、この取り扱いは、全体系の理解における制約条件でもある。これらの関係性を踏まえ、本論文では、道路構造物の付帯施設に対する全体系マネジメントの最適性に向けて、単純系マネジメントの最適性からの展開をするものである。その理由は、単純系対象物は、上記の制約条件から、付帯物の方が適性である。更に、付帯施設は、類似物が複数設置されているため、多体単純系として取り扱うことが容易である。これらより、本論文では、トンネル内に定間隔で複数設置されている照明施設（以下、「トンネル照明設備」と呼ぶ）を多体単純系の対象物として取り扱うものである。

一般に、マネジメントは、中心となる個体、その集合体である組織、更に、組織を取り巻く環境が不可欠である²¹⁾⁻²³⁾。そして、個体をマイクロレベル、組織をマクロレベルとして、環境からの影響を受けながら、マイクロ・マクロレベルが相互作用を及ぼしている²¹⁾⁻²³⁾。

アセットマネジメントも同様であり、狭義的（マイクロ）と広義的（マクロ）のマネジメントがある。狭義的とは、資産状態の観点から状態把握・状態予測によって、資産機能を管理する工学的マネジメントである。広義的とは、資産経営の観点から資産評価・資産運用によって資産価値を管理する経済・経営的なマネジメントである²⁴⁾⁻²⁶⁾。

このように、広義的マネジメントの運営は、組織を中心としたアプローチが必要である。その組織的アプローチは、組織を構成する個体のアプローチが初期の原動力である。これより、アセットマネジメント全体の機能的運営には、狭義的マネジメントと広義的マネジ

メントの双方に関連する組織内コミュニケーションを焦点とすることが実用的である。

上記から、本論文は、多体単純系となるトンネル照明設備を対象としたアセットマネジメントを取り扱うものである。また、本論文のマネジメント範囲は、狭義的部分と狭義的関連が高い広義的部分の組織内コミュニケーションを対象とするものである。

第2節 本論文の構成

2. 1 構成内容と構成図

本論文は、第1章から第6章で構成しており、図-1.1に示すとおりである。また、各章の概要は、次のとおりである。

【第1章 序論】

本研究の目的と本論文の対象範囲について、マネジメント論等から論理的に明確化する。また、本論文の構成を図示し、各章の概要を解説する。

【第2章 アセットマネジメントの現状と課題】

マネジメント論から、アセットマネジメント体系と狭義的・広義的の各マネジメント概要を解説する。また、狭義的・広義的の各既往研究から、現状課題を狭義的課題、広義的課題、全体課題に分類して整理する。更に、将来の高度情報化に向けたアセットマネジメントの全体課題を整理する。

【第3章 狭義的観点からの提案】

第2章の現状の狭義的課題と将来の全体課題に対して、狭義的観点からの具体的手法を提案する。はじめに、現状の狭義的課題には、収集・解析・計画のプロセスを考慮したデータ内容と解析モデルを提案し、解析モデルの劣化予測・補修計画における実用性を自然劣化時と地震時の双方から検証する。次に、将来の全体課題には、高度情報収集の観点から解析モデルの拡張性を検討する。

【第4章 広義的観点からの提案】

第2章の現状の広義的課題と将来の全体課題に対して、広義的観点からの具体的手法を提案する。はじめに、現状の広義的課題には、狭義的マネジメントを活性化する組織とコミュニケーションのあり方とそのコミュニケーションのツールである解析モデルのあり方を提案する。次に、将来の全体課題には、高度情報化に対する組織と組織コミュニケーションの理想像を提案する。

【第5章 アセットマネジメントの新展開への提案】

第3章と第4章の具体的提案から、狭義的・広義的を関連させたマネジメントの理想像を提案する。はじめに、狭義的・広義的関連マネジメントの具体内容を整理し、第2章の現在の全体課題に対する具体的対応性を検討する。次に、将来の高度情報化への対応可能性を検討する。

【第6章 結論】

本研究で得られた成果と今後の研究課題を整理する。

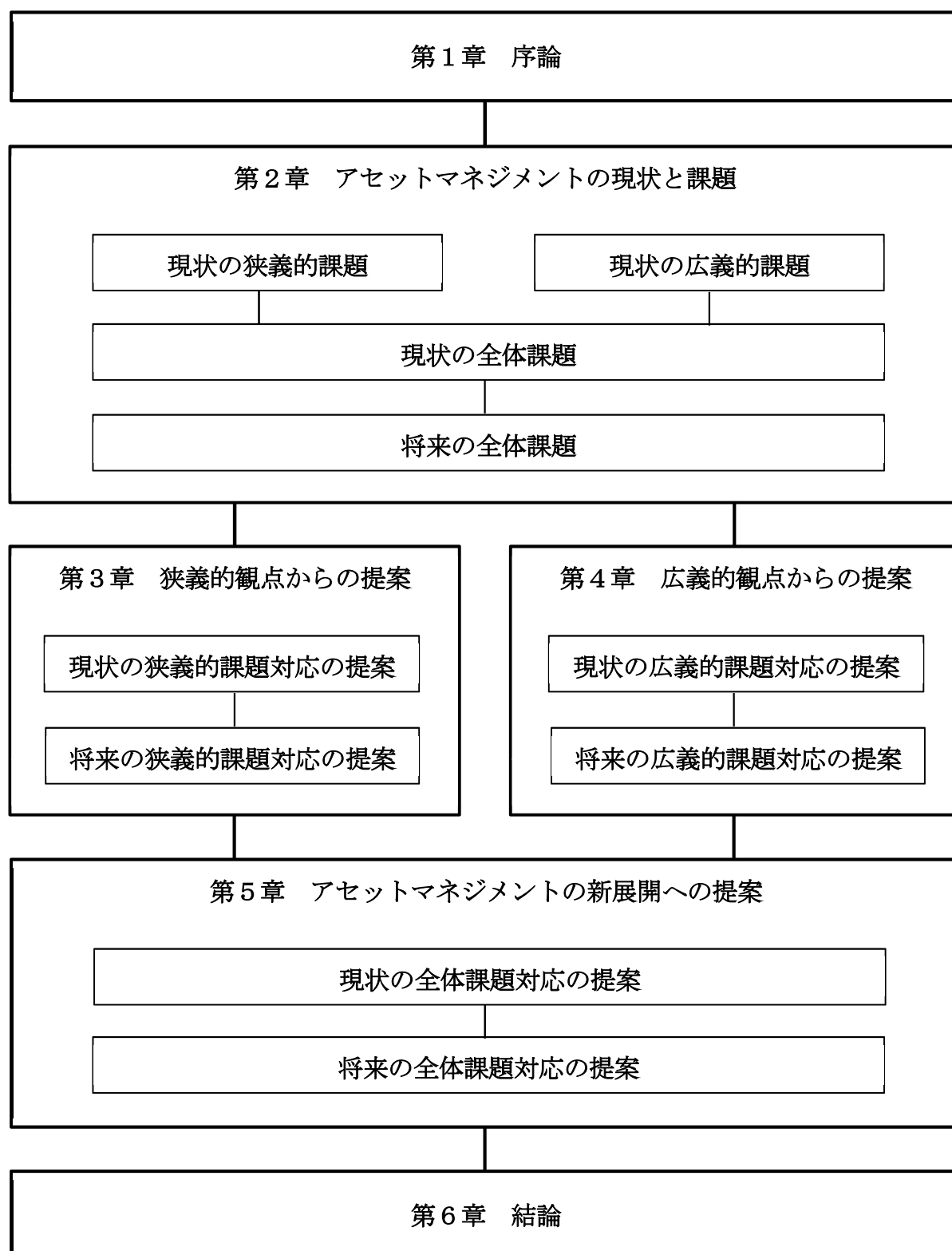


図-1.1 本論文構成

参考文献

- 1) P.F. ドラッカー(上田惇生編訳):【エッセンシャル版】マネジメントー基本と原則ー, ダイヤモンド社, 2001.
- 2) 小椋康宏:カストとローゼンツバイクによるマネジメント論ーその方法論上の特質との関連でー, 経営論集, Vol.4, No.1, pp.83-95, 1976.
- 3) 高瀬武典:組織進化とエコロジカル・パースペクティヴ, 組織科学, Vol.49, No.2, pp.4-14, 2015.
- 4) W. A. スピックス:マネジメント・セオリーー経営学説と最新の話題則ー, 培風館, 2009.
- 5) 土木学会編:アセットマネジメント導入への挑戦, 技報堂出版, 2005.
- 6) 二村敏子:<研究ノート>マネジメント論の在り方を考える, 帝京経済学研究, Vol.35, No.2, pp.77-90, 2002.
- 7) 上村敏之:公共経済学入門, 新世社, 2011.
- 8) 晴山一穂:公共性概念に関する一考察, 専修法学論集, Vol.106, No.1, pp.53-80, 2009.
- 9) 衣笠達夫:公共性に関する一考察, 日本計画行政学会関西支部年報, Vol.32, No.1, pp.1-15, 2012.
- 10) 橋爪大三郎:公共性とは何か, 社会学評論, Vol.50, No.4, pp.451-463, 2000.
- 11) 長谷川公一:共同性と公共性の現代的位相, 社会学評論, Vol.50, No.4, pp.436-450, 2000.
- 12) 齋藤純一:公共性, 岩波書店, 2000.
- 13) 今井重孝:比較教育学方法論に関する一考察ー「一般化」志向と「差異化」志向を軸としてー, 比較教育学研究, Vol.1990, No.16, pp.19-29, 1990.
- 14) 久保慶一:ディシプリンと地域研究ー比較政治学の視点からー, 地域研究, Vol.12, No.2, pp.164-180, 2012.
- 15) 田口茂:<差異>によって<同じさ>を定義するー現象学的考察ー, 日本認知科学学会大会発表論文集, Vol.34, No.1, pp.343-349, 2017.
- 16) 国土交通省:国土交通省所管分野における社会資本の将来の維持管理・更新費の推計, インフラメンテナンス情報, 社会資本の老朽化の現状と将来, 2018.
<https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/_pdf/research01_02_pdf02.pdf(参照 2021-06-06)>

-
- 17) 国土交通省編：令和2年度版国土交通白書，日経印刷，2020.
 - 18) ジェラルド・M. ワインバーグ (松田武彦監訳，増田伸爾訳)：一般システム思考入門，紀伊國屋書店，1979.
 - 19) フォン・ベルタランフィ (長野敬，太田邦昌訳)：一般システム理論，みすず書房，1973.
 - 20) 合原一幸，井村順一，堀尾喜彦，鈴木秀幸，寶来俊介：複雑系数理モデル学の基礎理論構築とその分野横断的の科学技術応用，電子情報通信学会基礎・境界ソサイエティ Fundamentals Review, Vol.8, No.4, pp.218-228, 2015.
 - 21) 大澤幸生：知識マネジメント，オーム社，2003.
 - 22) 槇谷正人：ビギナーズ経営組織論，中央経済社，2018.
 - 23) 柴直樹，水上祐治：経営情報システム入門，日科技連，2016.
 - 24) 宮川豊章，保田敬一，岩城一郎，横田弘，服部篤史：土木技術者のためのアセットマネジメントーコンクリート構造物を中心としてー，土木学会論文集 F, Vol.64, No.1, pp.24-43, 2008.
 - 25) 小林潔司，上田孝行：インフラストラクチャ・マネジメント研究の課題と展望，土木学会論文集，No.444/IV-61, pp.15-27, 2003.
 - 26) 岩松幸雄，早川裕史，原田隆郎：道路構造物の維持管理システムに関する研究，土木学会論文集，No.444/VI-16, pp.69-76, 1992.

第2章

アセットマネジメント の現状と課題

第2章 アセットマネジメントの現状と課題

第1節 アセットマネジメントの概要

1. 1 アセットマネジメントの目的

我が国は、高度経済成長期から平成のバブル期まで着実な社会経済的成長を遂げてきた。平成バブル期の1989年度から2020年度までの約30年間における税収と公共事業費・社会保障費については、図-2.1のとおりである。税収は、1991年度のバブル崩壊からの景気低迷により、所得税・法人税を中心に税収減少となっている。その後は、税制改革や緩やかな景気回復によって、若干の増加傾向にある。

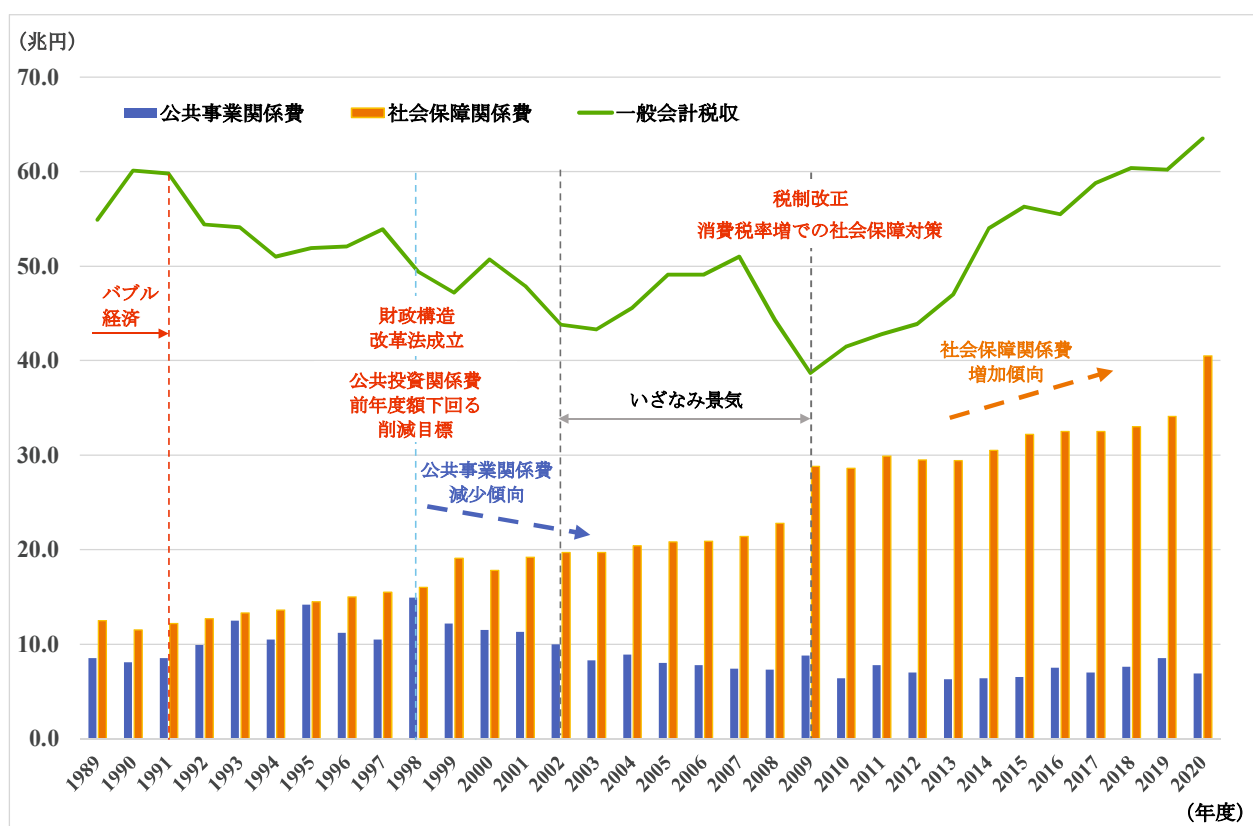


図-2.1 税収と公共事業費・社会保障費の比較（1989年度～2020年度）

※1 財務省「日本の財務関係資料」,「財務省編統計表一覧」より作成

しかし、今後の少子高齢化や人口減少化による税収減少は、国家財政を逼迫させる状況にある。このため、少子高齢・人口減少社会の到来は、「物」から「人」への財政投資の要因となっている。この社会資本整備から社会保障制度への財政投資転換によって、社会資本整備への投資財源は、減少傾向にある^{1),2)}。

一方で、高度経済成長期から整備した社会資本は、老朽化が顕著になってきている。このため、今後の国民に対する安全性を基軸とした社会資本の管理運営には、今まで以上の財政投資が必要となっている。具体的には、2018年度（5.2兆円）を基準に推計した場合、20年後（6.0～6.6兆円）、30年後（5.9～6.5兆円）の維持管理・更新費は、約1.3倍となる見込みである³⁾。

このような相反関係（トレードオフ）下での社会資本の機能維持には、財政上の国民負担バランスを考慮した仕組み（システム）づくりが必要とされている。このような相反関係における一般的数理手法は、多目的最適問題のような最適化問題としてパレート最適解を求めるものである⁴⁾⁹⁾。しかし、このような社会的・経済的な巨大単位と制約条件から最適解を導出するような場合には、一般システム論的思考が有効である⁹⁾¹⁴⁾。この方法は、関連要素から構成される高度な複合システムとして取り扱うことが可能となるためである。このような複合システムに対する問題解決概念が、制約的多目的最適化のための円環的マネジメントであり、これを図示化すると、図-2.2のとおりとなる。

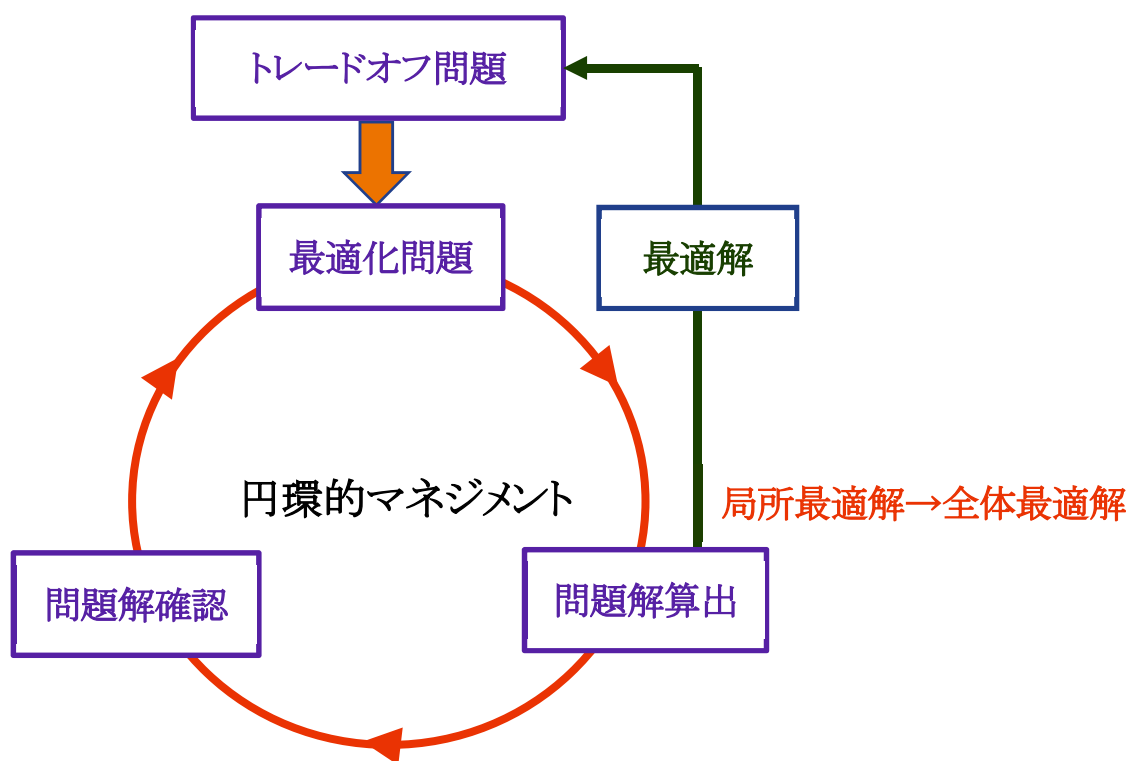


図-2.2 トレードオフ問題解決の円環的マネジメント関係図

一般に、複合システムには、フィードバック手法が重大な役割を担っている⁸⁾⁻¹⁴⁾。この理由は、局所最適解が全体最適解であることが恒常的成立をもたらさないからである。そのため、フィードバック手法をシステムに組み込み、各局所最適解に対して、全体システムでの最適解へ修正を繰り返すことで全体最適解に到達するのである⁸⁾⁻¹⁴⁾。この操作機能が、マネジメント機能である⁸⁾⁻¹⁴⁾。つまり、相反関係下における問題解決には、フィードバック手法によって、全体最適解を導出するマネジメントが有益なのである。このマネジメントは、目的到達のための効果を円環的に増幅化させる活動である^{15),16)}。これは、ファヨールを祖とする管理過程論やドラッカーのマネジメント論にも見られるものである^{14),17)-19)}。

このような論理性を兼備した問題解決概念が、制約的・多目的な最適化のための円環的マネジメントである。マネジメント論の解釈では、このマネジメント手法を資産の運用価値の最適化へ目的を進展させたものが、アセットマネジメントである^{20),21)}。一般に、アセットマネジメントとは、個人の金融資産に対して、上記活動を実施するものである。しかし、本論文の対象である社会資本のアセットマネジメントとは、一般的なアセットマネジメントにおける対象資産を社会資本に適用して、財政負担最小化と資産価値最大化を目的に資産管理運営を効率的・効果的に実施する活動である²⁰⁾⁻²²⁾。

1. 2 アセットマネジメントの体系と仕組み

アセットマネジメントの基本となる円環的管理は、マネジメント論において、品質管理と経営管理の2種類で構成されている。その体系図は、**図-2.3**のとおりである。前者は、デミング・サイクルと呼ばれる生産物の品質を管理するためのサイクルである。後者は、ファヨールからの管理過程概念を有した生産組織の経営を管理するためのサイクルである^{17),23)}。これらのサイクルは、相互作用（相互関係）を及ぼして回転している。

また、マネジメント構成は、構成の中心となる個体、その集合体である組織、更に、組織を取り巻く環境から成立している²⁴⁾⁻²⁶⁾。そして、個体をマイクロレベル、組織をマクロレベルとして、環境からの影響を受けながら、マイクロ・マクロレベルが相互作用を及ぼしている²⁴⁾⁻²⁶⁾。このようなマネジメント構成論を踏まえると、円環的管理は、相互作用するダブルループ構造となっている。これは、アセットマネジメントにも同様に該当するもので、マイクロレベルである狭義的管理とマクロレベルである広義的管理で構成されている。狭義的管理とは、生産物の品質的観点として、社会基盤施設の機能を管理する工学的な手法マネジメントである。広義的管理とは、生産組織の経営的観点として、社会基盤施設の価値を管理する経済・経営的な組織マネジメントである^{17),23),27)-29)}。マネジメント全体は、狭義的・広義的双方のマネジメントが相互作用するダブルループ構造となっている。そのため、狭義的・広義的双方のマネジメントのPDCA（Plan-Do-Check-Action）サイクルによって、マネジメント全体が螺旋的・累積的に円環（回転）向上するものである^{30),31)}。

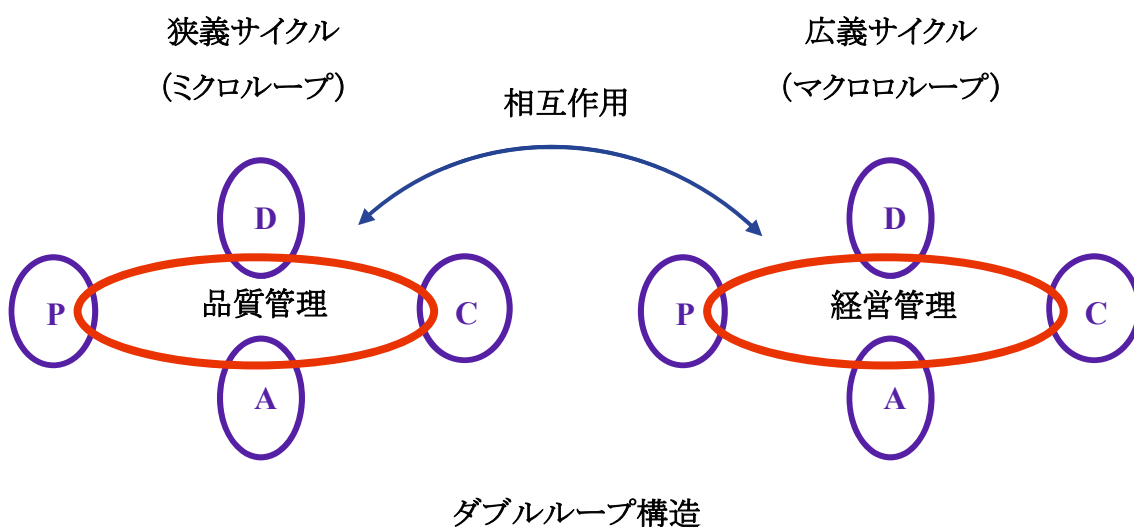


図-2.3 アセットマネジメントの体系図

1. 3 アセットマネジメントの具体と期待効果

アセットマネジメントは、その体系や仕組みから、PDCA（Plan-Do-Check-Action）サイクルで成り立っている。そのため、狭義的・広義的マネジメントは、サイクルステップである計画段階（Plan）・実行段階（Do）・確認段階（Check）・改善段階（Action）に区分され、双方のマネジメントが相互に関係するものである。これらの図示化は、図-2.4 のとおりである。これを踏まえて、狭義的・広義的マネジメントの具体は、各段階内容で明確化する。

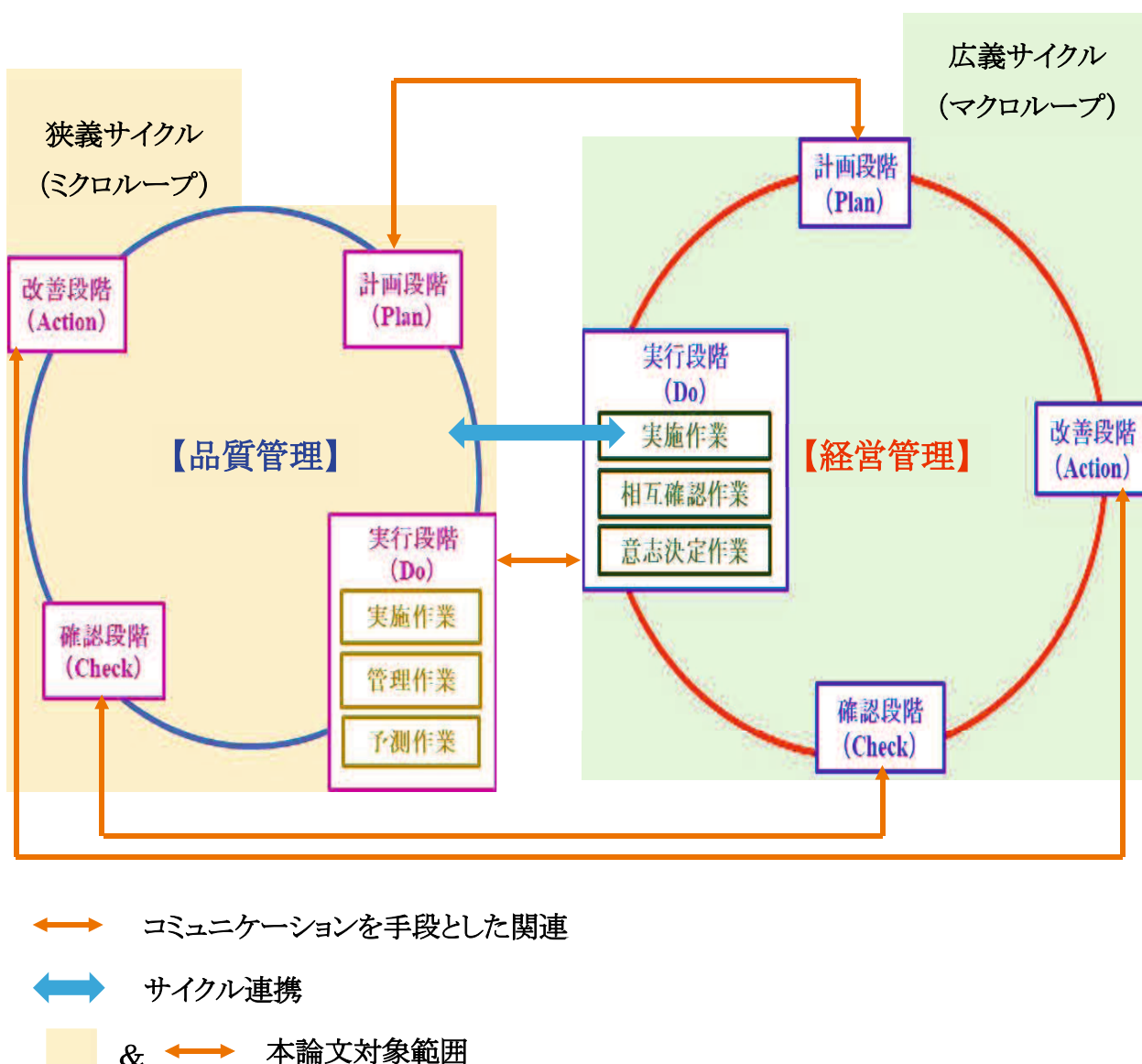


図-2.4 アセットマネジメントサイクルの具体関係図

狭義的マネジメントは、社会基盤施設の機能を安全な状態で維持管理するものである。

・計画段階 (Plan)

資産管理開始時に基本となる維持管理計画を策定する。

・実行段階 (Do)

実施・管理・予測に作業区分される。

実施作業は、維持管理計画を基本に点検やモニタリングによる状態把握や補修や更新による状態保持を行う。

管理作業は、状態把握や状態保持の実施内容を定量データ・定性データとして保存・管理する。

予測作業は、管理データを活用して、将来の状態を予測する。

・確認段階 (Check)

実行段階における予測作業の結果に対して、実施作業の感覚や経験を基本に管理作業の履歴を踏まえて計画段階に策定した維持管理計画の改善点や修正可否を検討する。

・改善段階 (Action)

確認段階に基づき維持管理計画の改善や修正の詳細内容（時期・手法）を検討し、維持管理計画に反映して再策定をする。

そして、この再策定された維持管理計画が、次サイクルの計画段階に相当し、次サイクルを経ることで、螺旋（スパイラル）的に向上するものである。

広義的マネジメントは、社会資本の価値を組織的に経営管理するものである。

・計画段階 (Plan)

資産管理開始時に基本となる経営管理計画を策定する。

・実行段階 (Do)

実施・相互確認・意志決定に作業区分される。

実施作業は、経営管理計画を基本とした維持管理計画による狭義的マネジメントサイクルを実施する。

相互確認作業は、狭義的マネジメントのサイクル全体と各ステップ（計画段階・実行段階・確認段階・改善段階）の状況や課題を狭義的サイクルの実施者と相互確認（コミュニケーション）をする。

意志決定作業は、狭義的マネジメントにおける状況や課題の相互確認から必要となる改善や修正に対して、次サイクルでの実施について意志決定をする。

- ・確認段階 (Check)

実行段階での狭義的マネジメントや連携支援に対し、計画段階で策定の経営管理計画内容から評価をする。

- ・改善段階 (Action)

確認段階の評価から見出される経営・組織的な改善や見直し内容を経営管理計画に反映して再策定をする。

そして、この再策定された経営管理計画が、次サイクルの計画段階に相当し、次サイクルを経ることで、累積的に進化するものである。

このように、狭義的マネジメントと広義的マネジメントは、共に PDCA サイクルで成立しており、双方のマネジメントは、PDCA サイクルの各段階で関連しているが、特に実行段階で大きな関連を有するものとなっている。これは、広義的マネジメントにおける実行段階の実施作業は、狭義的マネジメントが大部分に該当するため、実務面と組織面の両面から他段階（計画・確認・改善）より、関連性が大きくなっている。そして、狭義的マネジメントと広義的マネジメントの関連には、各段階で双方のマネジメント運営者間のコミュニケーションが基本となっている。

次に、アセットマネジメント導入における期待効果を検討する。一般に、マネジメントの効果対象は、マネジメントにおける過程（プロセス）と目的・目標（ゴール）に分類できる。ここでは、前者に対するものを中間効果、後者に対するものを最終効果とする。この場合、中間効果は、マネジメントの運営者を対象とした主観性優位効果である。また、最終効果は、マネジメントの関係者を対象とした客観性優位効果である。一般に、マネジメントとは、企業組織がゴーイングコンサーンである限りにおいて、半永久的に継続されるものである。このため、連続時間的な視点では、過去のマネジメントにおける最終効果は、過去から現在までのマネジメントにおける中間効果となっている。これにより、本来の最終効果は、企業組織がゴーイングコンサーンでなくなる時点での効果に相当するため、プロジェクト単位での最終の効果を一般に最終効果としている。これらを踏まえると、中間効果は、効果の基本であり、最終効果とは、プロジェクト単位での最終に相当する中間効果を客観性にも配慮したものと考えることができる。

一般に、客観性の基本とは、明証・合理である³²⁾⁻³⁴⁾。これらは、説明責任（アカウンタビリティ）や合意形成（コンセンサス）で具現化される。つまり、最終効果は、対象プロジェクトの目的・目標（ゴール）について、関係者に明証合理的に説明と合意ができることである。具体には、アセットマネジメントの広義的適正である目標・目的（機能指標・事業費指標）への進捗（到達）について、マネジメント関係者に論証・合理的な説明によ

り、合意を確保するものである。このため、最終効果では、定量的・公式的・組織的なツールが選択される傾向にある。

一方、マネジメント効果の中核である中間効果は、時間軸上で任意に設定可能であり、主観性の基本となる機能的・可視的（実在的）なものである^{35),36)}。このため、中間効果は、任意の時点でのマネジメント過程（プロセス）について、運営者が機能的・可視的に調整・共有できることである。具体には、アセットマネジメントの狭義的適正であるPDCAサイクルと各段階の効率（能率）について、機能・可視的に認識・行動を確保するものである。このため、中間効果では、定性的・非公式的・非組織的なツールが選択される傾向にある。

このように、アセットマネジメントの期待効果は、中間と最終に分類され、効果の時期、内容、手法も異なるが、客主観的なマネジメントコントロールの把握と理解が基本である。つまり、中間効果は、狭義・広義マネジメントにおけるPDCAサイクルと各段階の効率について、機能・可視的に把握・理解できるものである。また、最終効果は、アセットマネジメント全体の目標への進捗について、論証・合理的に把握・理解できるものである。そして、客主観的なマネジメントコントロールの把握と理解には、マネジメント運営者のみならず関係者も含めたコミュニケーションが不可欠である。

第2節 アセットマネジメントの現状

2.1 狭義的マネジメントの現状

社会基盤施設の管理運営でアセットマネジメントという言葉が使われるようになったのは、2001年国土交通省策定の道路重点施策からだと言われている³⁷⁾。現在までの約20年間に於いて、アセットマネジメントの狭義的マネジメントは、PDCAサイクルの計画・実行・確認・改善の各段階における専門技術と共に進化してきた。このため、狭義的マネジメントの現状は、マネジメント内容と専門技術との関係性視点から確認する必要がある。狭義的マネジメントと代表的な専門技術との関係は、表-2.1のとおりである。

表-2.1 狭義的マネジメントと専門技術の関係

効果区分	人的観点		物的観点	
	マネジメント	専門技術	マネジメント	専門技術
直接効果 (代替機能)	将来 (自動化対応時)		実行段階 (Do)	補修更新 耐凍耐食性材料 ・コンクリート ・鉄筋 ・金属部品 高機能性材料 ・LED部品 ・低耐熱部品
間接効果 (支援機能)	実行段階 (Do)	点検	モニタリング ・高感度カメラ ・画像処理 ・GPS センシング ・X線、レーザー ・周波数測定	/
		補修更新	高所閉所対応機器 ・リフター ・ドローン	
		データ管理 データ解析	データベース ・BMS、PMS 解析システム ・BMS、PMS	
	計画段階 (Plan)	計画策定	点検解析結果 ・BMS、PMS	
	確認段階 (Check)	計画検証	点検解析結果 ・BMS、PMS	
	改善段階 (Action)	計画修正	点検解析結果 ・BMS、PMS	

マネジメントと専門技術の関係性は、対応性と効果性の視点に区分される。対応性視点とは、専門技術が担うマネジメント内容であり、人的観点と物的観点到に分類できる。効果性視点とは、専門技術によるマネジメント効果であり、直接効果と間接効果に分類できる。ここでは、狭義的マネジメントの各段階での専門技術を上記の視点から確認をする。

狭義的マネジメントの専門技術は、実行段階 (Do) の実施作業と管理作業が中心である。実施作業では、点検と補修更新に分類される。点検では、感性点検 (目視・触手・打音) において、画像 (X線・レーザー・高感度カメラ・画像処理) や振動 (周波数測定) をはじめとした各種のセンサーや計測器によるセンシング・モニタリング技術の支援による状態把握が可能となっている³⁸⁾。補修更新では、塩化物イオン浸透抵抗性や耐凍・耐食性に優れたセメント系補修材料や耐食鉄筋のような材料が開発されている³⁸⁾。特に、高耐久BFS (高炉スラグ細骨材) コンクリートを用いたプレキャスト部材は、土木学会コンクリート工学委員会の指針作成 (案) 刊行まで実装されている³⁸⁾。また、管理作業では、点検結果用紙による保管から電子データでの保管に変化し、更に、将来の状態予測解析と連携したBMS (Bridge Management System: 橋梁管理システム) やPMS (Pavement Management System: 舗装管理システム) のようなデータシステムとして、点検データが保管されるようになっている³⁷⁾⁻⁴²⁾。これらは、確認段階 (Check)・改善段階 (Action)・計画段階 (Plan) における支援ツールとして活用され、補修更新計画や点検計画の策定や見直しの意思決定に役立っている³⁷⁾⁻⁴²⁾。

これらを踏まえて、対応性・効果性の両視点から確認する。物的観点では、補修更新で新機能性材料による資産機能延長に寄与する直接効果 (代替機能) のみが対象である。しかし、人的観点では、PDCAサイクルの各段階において、間接効果 (支援機能) となる専門技術でマネジメントが成立されている。

これより、現状の狭義的マネジメントは、人的支援となる専門的要素技術を中心に支えられていることが確認できる。また、今後は、物的代替機能として新材料・新素材開発の基礎技術拡大と人的代替機能として実行段階での自動化展開が求められている。

2. 2 広義的マネジメントの現状

広義的マネジメントは、狭義的マネジメントサイクルと密接に関連し、マネジメント全体を機能させている。そのため、広義的マネジメントは、マネジメント全体の効果に対して、大きな影響を及ぼすものである。これから、広義的マネジメントとは、効率の解釈と追求である。このため、広義的マネジメントの具体内容は、効率解釈とその実施内容の視点で確認する。マネジメント論での代表的効率解釈と広義的マネジメントの実施内容との関係は、表-2.2 のとおりである。なお、効率解釈における効率概念や定義は、学術分野でも様々であり、政策的観点においても統一の見解があると言い難いものである⁴³⁾。そのため、効率定義による解釈議論は、本論文内容から超逸するので、効率解釈イメージとその追求に留めた内容とする。

初期の効率対象は、物的視点（物的視点）での経営資源管理であり、その中核にコスト管理がある。これは、マネジメント理論史においても概観できる。テイラーによる科学的管理法は、種々の資金を対象に効率性（能率性）を追求している^{19),25),43),44)}。また、ファヨールは、現在の PDCA サイクルマネジメントの基礎となる円環型マネジメントとして、計画・組織・指令・調整・統制で成立する管理過程論から経営資源の効率性（合理性）を追求している^{19),25),43),44)}。このような物的視点から経営管理する広義的マネジメントでは、LCC（Life Cycle Costing）型マネジメントが挙げられる。

表-2.2 広義的マネジメントの効率解釈と実施内容

効率視点	効率対象	実施内容		
		マネジメント論		広義的マネジメント
物的視点 (物的視点)	資産・資源	テイラー	・ 科学的管理法	・ LCC型マネジメント ・ PPBS型マネジメント
		ファヨール	・ 管理過程論	
人的視点 (生態的視点)	価値・制度	バーナード	・ 開放システム ・ コミュニケーション意志決定	・ NPM型マネジメント
		サイモン	・ 複合システム ・ 価値前提意志決定 ・ 限定合理性 ・ コンティンジェンシー理論	

これは、狭義的マネジメントを中心に、資産機能と管理コストの効率性を追求するものである^{20)-22),42)}。具体には、社会資本の機能維持における資金や資源の効率性をコスト（貨幣ターム）から、最適バランスを効率性として追求するものである。広義的マネジメントでこの考え方を活用した実施例では、PPBS（Planning Programing Budgeting System）型マネジメントがある。PPBS 型マネジメントとは、LCC 対象を社会資本管理群（多種且つ多数の管理対象となる社会資本）に拡張したマネジメントで、1960 年～1971 年に米国で実施されたものである^{20),43)}。これらのマネジメントは、科学的に定量管理された利点を有しているが、内外環境変化による経営資産や経営組織への影響という人的視点（生態的視点）まで考慮していないものである。

これより、効率対象は、人的視点（生態的視点）も含めた経営資源管理に進展することになる。このような変流は、マネジメント論史においても同様である。バーナードは、組織を各要素で構成される協働集合体である開放システムとして、目的・情報の共有とその手段であるコミュニケーションからの意思決定を中心とした効率性（能率性）を追求している^{19), 25), 43), 45)}。また、サイモンは、意思決定における限定合理性を展開し、内外環境に対する制約条件とその適応としてのコンティンジェンシー理論から効率性（満足性）を追求している^{19), 25), 43), 45)}。このような人的視点から経営管理する広義的マネジメントでは、NPM（New Public Management）型マネジメントが挙げられる。これは、内外環境に適応可能な資産価値として、効率性を追求するものである^{20),43),46)}。具体には、資産価値と投資の効率性を外的な機能享受満足や内的な組織制度変革・業績評価から追求するものである。国内では、2003 年に国土交通省の道路行政において、NPM 型マネジメントの運用が開始されている²⁰⁾。また、海外では、米国の FHWA（Federal Highway Administration）や英国の HA（Highway Agency）において、NPM 型マネジメントの運用がされている^{20), 43), 47)-49)}。FHWA では、1990 年代に BMS の開発による LCC 最適化の費用便益分析から事業評価までをシステム化で実施している^{20), 43), 47), 48)}。また、HA では、維持管理の民間活用として、官民協働スタイルである PPP（Public Private Partnership）方式を導入している^{20), 43), 47), 49)}。これは、維持管理業務の制度的な効率化として、1997 年に実務作業と実務管理の分割契約方式（スーパーエージェント制度）で導入されたものである。更に、2001 年には、実務作業と実務管理の一体化契約方式である MAC（Managing Agency Contractor）契約導入で、制度効率化を推進している^{20),43),47),49)}。このように、国内外において、NPM 型マネジメントの導入や運用がされており、広義的マネジメントの定着と発展が期待される状況である。

第3節 アセットマネジメントの課題

3. 1 狭義的マネジメントの課題

狭義的マネジメントの課題は、PDCA マネジメントサイクルの各段階に関連させて抽出すると、資産の状態把握・データ管理・データ解析・計画管理（マネジメント管理）の4点となる。これらの基本的な課題と対応をまとめると表-2.3のとおりである。

表-2.3 狭義的マネジメントの基本的な課題と対応

区分	課題	対応		
		方法案	主務者 (中心者)	副務者 (関連者)
状態把握	点検の正確性・迅速性 ・技術差異解消 ・結果バイアス排除	点検技術情報の共有化 ・劣化メカニズムの習得 ・劣化の映像化活用 ・点検マニュアルへの反映 点検技術教育の実施 ・研修等での実践教育 ・コミュニケーション活動 (公式・非公式)	点検実施者	データ管理者 データ解析者 マネジメント 管理者
データ管理	各種データの管理適応性 ・損失リスク対応 ・データ連携対応 ・データ活用拡大	データベースシステムの構築 ・損失改ざん防止技術の活用 ・関連データの連携 ・解析結果へのフィードバック ・点検補修実務での活用 ・マネジメントでの活用	データ管理者	点検実施者 データ解析者 マネジメント 管理者
データ解析	解析結果の活用 ・実務本質再認識 ・マネジメント連携	解析プロセスの共有化 ・解析モデルの共有理解 ・解析手法の簡易性追求 ・解析手法の拡張性検討 ・マネジメントへの適用 (マネジメントツール化)	データ解析者	点検実施者 データ管理者 マネジメント 管理者
計画管理	マネジメント品質向上 ・実務連携支援対応 ・データ活用拡大 マネジメント定着確保 ・実務精度向上 ・実務効率向上	各対応内容の連携化 ・各種データと映像の連携活用 ・解析結果データの実務反映 マネジメントツールの共有化 ・解析結果データのツール化 ・コミュニケーションでの活用 (コミュニケーションツール化)	マネジメント 管理者	点検実施者 データ管理者 データ解析者

第1点目は、資産の状態把握としての点検・モニタリングにおける正確性と迅速性のある意思決定手法の確立である。社会基盤施設の維持管理の原点は、時空間軸上における状態把握である。状態把握は、把握の実施（点検やモニタリング）と実施内容の認識（結果の意思決定）で構成される。認識行為（意思決定）には、時空間概念が基本となるため、時空間次元も含めて資産の状態となる。このように、点検やモニタリングには、時間軸と空間軸の形成が必要となるが、現在では、ICT・GISの情報通信技術の発展により、時空間での正確なデータの迅速な取得が可能となった。また、資産状態の機械的把握では、高感度カメラの映像技術やAIの映像解析による機能向上により、亀裂や腐食のような表面画像での劣化把握が進展している。一方で、機械的把握は、高所・閉所部での対応や画像・解析における精度向上等の実用的観点からの課題があり、それらの解決が期待されるところである。これらを踏まえると、状態把握においては、今後、機械的モニタリングの拡大領域であるが、当面は、経験豊富な点検実務者の点検と機械的モニタリング支援による結合スタイルの確立が主務である。この結合スタイルとは、人的な点検が保有する種々の課題に対して、機械的なモニタリングでフィードバックして補完支援するものである。結合スタイルの確立は、人的な点検結果に対する機械的なモニタリングによる客観検証での機能補完を意図するものである。

これらを踏まえて、人的な点検における課題を抽出する。一般に点検は、実施者が実施基準に従って、目視や触手による感性経験を活用して実施するものが大部分である。この感性とは、点検対象物の損傷や腐食等の劣化状態の程度を確認する実施者の主観的能力である。そのため、点検結果は、感性で判別可能な劣化差異範囲による離散的な複数段階での評価が基本となっている。つまり、実施者は、点検対象物の状態を感性で認識して、実施基準に照合させながら該当段階を結果とする手法である。このような手法は、正確性の観点から点検実施者が保有する情報内容（質的・量的）に依存することは明白である。点検実施者は、状態判断の際、高質且つ大量な情報を保有していれば、点検結果の正確性は向上する。しかし、現状は、少子化と高度情報化による点検実施者の減少や豊富な経験者の高齢化によるリタイアが顕著化している。このような社会経済情勢により、点検実施者の保有情報は、少量低質傾向にあることは否定できない⁵⁰⁾。

このような状況から、今後は、点検実施者の質的・量的な情報拡充を図るための実践的教育が必須である。また、点検基準の詳細解説となる点検実施マニュアル等（以下、「点検マニュアル」と呼ぶ）は、点検実施者の経験不足にも対応した内容に見直すことが必要である。一般に、点検の実施には、点検対象物における劣化メカニズムの理解が不可欠である。このため、点検マニュアルには、劣化メカニズムの時間現象を実物と照合可能な画像

での可視化が必要である。また、経験豊富な点検実施者の個別的となっていた大量高質な判断情報を集積化・共有化することで、全点検実施者が共通に大量高質な情報を保有できるように再形成することも重要な課題である。これは、経験不足の点検実施者に対する知識補完に留まらず、点検実施者の点検結果差異を発生させるバイアスの排除に繋がることが期待できる⁵¹⁾。

点検作業とは、感性経験からの意思決定で結果判定をするヒューリスティック手法であるため、点検実施者の結果判断基準差異によるアンカリングバイアスが発生する^{51),52)}。アンカリングバイアスとは、個人的な保有情報を基準に限定的情報収集や調整をした意思決定をすることである^{51),52)}。点検作業では、同類の点検対象物が多数存在し、その結果判断が難易な場合に基準とする対象物の現象と判断結果から比較調整をするヒューリスティックである⁵²⁾。この対応策には、点検実施者の結果判断基準を同等化して差異を軽減することである。このように、点検マニュアルの知的共通化やその内容を踏まえた実践教育は、アンカリングバイアス対策になっている。また、点検実施者間のコミュニケーション活動は、上記対策の効果促進に繋がるものである。一般に、コミュニケーション活動には、公式的（組織的）活動と非公式的（非組織的）活動がある。公式的活動とは、点検結果の最終判定会議等での情報共有である。非公式的活動とは、点検内容や手法の実務等での情報共有である。これらのコミュニケーション活動の組み合わせは、点検作業の正確性や迅速性の向上に不可欠である。

第2点目は、資産の状態把握データと関連データの管理適応性の確立である。状態把握データと関連データは、全てのマネジメント関係者に対して実用性が高いものである必要がある。マネジメント関係者とは、データ管理者、データ解析者、点検補修実施者、マネジメント管理者である。ここで、各関係者の観点からデータ管理の課題を抽出する。

データ管理者の観点は、汎用形式での簡易性の高いデータベースシステムとすることである。これは、関係者間におけるデータ取得の容易性とデータ活用の効率性を高めることに繋がるものとなる。また、多数の関係者は、データ取得やデータ活用をするため、データ喪失等のリスク対応可能なデータ管理も重要である。

データ解析者の観点は、関連データ（環境データ、履歴データ、諸元データ）を踏まえたデータベースシステムの形成である。環境データとは、時間データ（点検・補修の実施時間）や空間データ（点検・補修の実施場所）をはじめとした各種解析の説明変数となるデータである。これらは、資産の内的データ（構造・材質等）と外的データ（設置環境等）に区分される。履歴データとは、過去の状態把握データと補修更新データである。設置から時間経過している資産では、設置時からの全履歴データをデータベース化することが困

難な場合が多々ある。このような場合には、資産状態の解析（劣化解析・健全度解析）において限定性や僅少性を考慮したモデル検討やデータの取り扱いが必要となる。よって、履歴データの確保は、解析の精緻化や効率化に繋がる重要課題である。諸元データとは、設置年月や構造内容（製造者名・材質・形式等）のような資産基本台帳となるデータである。これは、環境データや履歴データを解析に有効活用させるための基礎データとなるものである。これらのデータ連携は、現在の状態把握や将来の状態予測のための有益な解析を可能とするものである。また、解析結果データは、データベースへのフィードバックで、各種データとの連携向上が図れるため、関連データの活用拡大と精度向上が期待できるものとなる。

点検補修実施者の観点は、点検補修における履歴データと履歴映像の視覚確認による点検補修の正確性と効率性の支援である。点検や補修の基本となる状態把握では、現状と過去との対比による状態差異を視覚的に見いだすことで正確性と効率性の向上に繋がる。そのため、実施時に履歴データや履歴映像の対比と諸元データ（設置年月や構造内容）の確認ができるシステムの形成が必要である。これは、第1点目の状態把握における正確性と迅速性に向けた課題の克服にも繋がるものである。

マネジメント管理者の観点は、状態把握データと解析データの相互確認による計画策定、環境データや諸元データによる計画修正や補修更新検討への適用拡大である。上記関係者（データ管理者・データ解析者・点検補修実施者）のデータ管理適応性の確立は、関連データの精度向上と随伴したマネジメントの向上に連応することになる。そして、マネジメント管理者を含めたマネジメント全関係者に対するデータ管理適応性の確立に繋がるものとなる。

第3点目は、解析結果のマネジメントへの活用拡大である。解析結果は、状態把握データやその関連データと同様にマネジメント全関係者に実用性の高いものであることが重要である。しかし、解析内容は、解析プロセス（解析モデルや解析手法）が複雑・難解であることから、それらの理解や活用を主業務とするデータ解析者に限定された活用となっている。解析プロセスが簡易的で理解可能な場合には、解析結果も解析プロセスを踏まえた理解となり、マネジメント全関係者での実用性が高くなることが期待できる。ここで、各関係者における状態解析結果の活用可能性を検討する。

点検補修実施者では、資産の点検時や補修時に解析結果と照合することで、現時点での状態把握や補修状況の確認に正確性や効率性を高めることが期待できる。これは、公式的コミュニケーションとなる点検最終判定会議等で、点検や補修の実施状況結果に対する理由根拠として活用できるものとなる。このような活用は、会議内容の高度化や客観化を促

進ませて、結果内容の正確性と効率性に繋がるものである。上記のように、解析プロセスの簡易性追求は、マネジメント全関係者に対して、マネジメントの全体像・役割分担・役割連携の再認識が可能となり、マネジメント全体の正確性と効率性の向上と発展が期待できるものである。

一方で、解析プロセスの簡易性追求には、解析の基礎となる各種データの正確性に大きく依存するため、正確な点検状態や補修更新の実施結果が不可欠である。また、解析プロセスは、データ内容やデータ量に適応した解析結果を導出することが重要である。しかし、長期間設置の資産では、データ内容やデータ量の充実化による変化で、解析プロセスの検討が必要となる場合もある。そのため、解析プロセスは、データ内容に応じた簡易性とデータ変化に対応可能な拡張性の双方を有することが課題である。

第4点目は、マネジメントにおける品質向上と定着確保である。これらは、第1～3点目と連動しているため、第1～3点目の各対応を含めたマネジメント全体での対応が必要である。

品質向上は、各種データの正確性確保と解析結果の妥当性確保が重要である。

各種データの正確性は、点検補修実施段階における実施結果である状態把握データやその関連データの正確性が基本である。また、各種データ管理は、マネジメント関係者の活用からの確認修正により、正確性向上が期待できる。これらは、第1～2点目の課題と連動しているものである。

解析結果の妥当性は、解析プロセスの簡易性や実用性による透明化で、解析結果のマネジメント関係者の活用による確認修正で妥当性向上に繋がるものである。これは、第3点目の課題と連動しているものである。また、第1～3点目の課題対応主務者は、第1～3の順に、点検補修実務者、データ管理者、データ解析者である。しかし、この対応には、副務者の支援なしでは不可能である。

第1点目の課題対応主務者である点検補修実務者は、データ管理者の履歴映像データシステムやデータ解析者の解析結果の支援で正確性や効率性の確保が加速する。このように各課題の対応主務者は、他課題の対応副務者となって他課題対応の支援をしている連動関係性を有しているのである。マネジメント管理者は、この関係性を認識の上で、各関係課題の実施確認を連動させることで、各課題対応の効果増幅とマネジメント全体の向上に繋がるものである。

定着確保には、マネジメントでのコミュニケーションの活用とその手段の確立が必要である。マネジメントは、マネジメント関係者の役割分担と関係者間の連携によって形成されている。このため、マネジメント機能を発現・定着させるためには、マネジメント全関

係者の全体像・役割分担・役割連携の再認識が不可欠である。その再認識には、マネジメント関係者間の公式的・非公式的なコミュニケーション活動が有効である。これは、品質向上の課題における対応者の関係性（主務対応者であり副務対応者である関係）でもコミュニケーションの必要性を明示している。そして、コミュニケーションの活発化には、コミュニケーションツールが必須である。つまり、このコミュニケーションツールとは、マネジメントツールでもある。

今後の社会経済情勢からは、AIやIoTを代表とする高度情報処理として、ビッグデータの管理と解析を基本としたマネジメントが予測される。このマネジメントツールは、マネジメント関係者間で共通に活用ができる各種管理データに他ならない。その中で、最重要ツールは、解析結果データである。その理由は、次のとおりである。解析結果とは、資産状態の表象となる解析モデルの手法結果であり、マネジメントの可視的縮約成果（アウトプット）である。つまり、解析結果データは、資産状態を可視化したマネジメント成果であることから、マネジメント関係者間コミュニケーションを活発化するマネジメントツールである。

これらから、今後の最重要課題は、マネジメントツールとなる解析結果データの有効活用である。そのためには、解析プロセス（解析モデルや解析手法）を中心にした解析結果データからマネジメントの品質向上や定着への課題解決をすることが基本である。

3. 2 広義的マネジメントの課題

広義的マネジメントの課題は、狭義的マネジメントサイクルとの関連性から抽出すると、資産管理の組織体制・情報共有・環境対応の3点となる。これらの基本的な課題と対応をまとめると表-2.4のとおりである。

第1点目は、資産管理における効率的なマネジメント体制の確立である。広義的マネジメントは、資産を組織的に経営管理する階層型のマネジメント体制である。広義的マネジメントは、狭義的マネジメントと相互作用（相互関係）している。このため、広義的マネジメント運営には、広義的・狭義的マネジメント関係者を含めたマネジメント体制の確立が必要である。

表-2.4 広義的マネジメントの基本的な課題と対応

区分	課題	対応	
		方法案	対応者
組織体制	マネジメント体制の確立	全関係者参加型体制 ・階層的参加（縦型参加・公式的） （経営層・管理層・実務層） ・サイクル型参加（横型参加・非公式） （狭義的・広義的） 関係者間の連携強化（情報共有） ・階層間強化（縦型強化・公式的） （経営層・管理層・実務層） ・サイクル間強化（横型強化・非公式） （狭義的・広義的）	マネジメント関係者
情報共有	効率的情報共有の確立	実効的な情報共有手法 ・成果（アウトプット）の情報共有 ・情報の可視化（成果の理解共有） コミュニケーションの活用 ・コミュニケーションツールの形成 ・公式・非公式活動の活性化	マネジメント関係者
環境対応	価値マネジメントの確立	固定価値の確保 ・資産機能の確保（安全・安心の確保） ・資産機能の発展（定時・快適への発展） ・資産価値の最適化（LCC型への展開） 環境変化対応型の価値形成 ・社会経済変化対応の価値 （高度情報・少子高齢・人口減少対応）	マネジメント関係者

一般に、マネジメント体制では、要員の役割分担と役割相応の情報共有手法を確立することが必要である。国内のアセットマネジメント運営企業は、階層型（経営層・管理層・実務層）組織となっている。各層の主な役割は、次のとおりである。経営層は、マネジメント全体における目的・方針の意思決定とアウトプットの外部発信である。管理層は、経営層の運営支援とマネジメント実務管理である。実務層は、狭義的マネジメントの実務執行である。経営層の意思決定には、狭義的マネジメントの状況や課題の把握が基本であるため、実務層との情報共有が必要である。このためには、実務層まで含めたマネジメント全関係者の参加型体制と縦型の各層（経営層・管理層・実務層）間と横型のマネジメントサイクル（広義的・狭義的）間の連携強化の確立が課題である。

第2点目は、マネジメントにおける効率的な情報共有の確立である。第1点目のマネジメント体制における関係者間の連携強化には、効率的な情報共有が不可欠である。効率的な情報共有とは、その情報が保有する本質を抽出して、各役割視点から正確に理解できるものに変換させることである。これを全てのマネジメント情報で実施することは、理想であるが、現実的に困難であるため、主要情報に対して実施することが実効的である。その主要情報に該当するものは、マネジメントにおける成果（アウトプット）関連情報である。

狭義的マネジメントでは、解析結果データ（状態解析結果データ）であり、広義的マネジメントでは、目標管理データ（指標管理データ）が該当する。解析結果データは、狭義的マネジメントの資産機能に対するアウトプット情報であり、広義的マネジメントの資産価値に対するアウトプット支援情報となっている。目標管理データは、広義的マネジメントの目標到達（資産価値・資産機能）に対するアウトプット情報であるため、狭義的マネジメントのアウトプット情報でもある。これらの情報が、マネジメント体制上の各役割視点から理解可能なものであることで、単純な情報提供ではなく、補完的な情報認識としての共有化に進展することが期待できる。そのためには、マネジメント目的に相応した情報抽出と各役割視点での多様な情報変換の検討が不可欠である。特に、広義的マネジメントの費用便益分析結果や狭義的マネジメントの状態解析結果（劣化解析結果・健全度解析結果）は、分析・解析プロセスとあわせた理解が不可欠である。これらのプロセスは、難解であるため、情報の本質や変換を考慮したプロセスが情報認識の共有化に必要である。そのようなプロセスの形成や活用には、各役割の理解や認識を基本とした公式的（縦型）・非公式的（横型）なコミュニケーション活動が不可欠である。更に、コミュニケーション活動を活性化するには、効率的情報を認識可能とするコミュニケーションツールの形成が必要となる。これらから、コミュニケーションツールには、情報認識の共有化を考慮した解析プロセスによる解析結果データが最適である。このように、ポジティブなマネジメント

活動展開には、最適なコミュニケーションツール形成とそのツール利用したコミュニケーションが不可欠である。

第3点目は、社会基盤施設を取り巻く環境要因変化に対応した価値マネジメントの確立である。広義的マネジメントは、資産価値を適切に評価して効率的に管理運営するものである。

現代は、AI・ICTに代表される情報技術革新が著しく、将来的にも加速化傾向にあると想定される。このため、社会基盤施設を取り巻く社会経済環境も大きく変化していくことが想定される。しかし、どの時代においても社会基盤施設は、国民生活と密接に関係した重要機能であることに相違はない。そのため、安全・安心を基軸にした資産管理の原点は、揺らぎない固定価値である。

一方で、社会経済的な環境変化を的確に認識して、社会基盤施設の資産価値に対する定義や意識の変化に対応したマネジメント運営も重要課題である。特に、外的環境変化は、経営層だけでなく、マネジメント全関係者に影響するものであるため、縦型（各層）と横型（マネジメントサイクル）からの環境変化要因の把握とその対応の情報共有が重要になると想定される。この情報共有は、環境変化に対応した価値形成とその価値マネジメントの構築に繋がるものである。

このように、広義的マネジメントの課題は、激変する内外環境と密接に関連している。そのため、従来のマネジメントにおける実効的な課題対応を基本にして、今後の環境変化に対応可能なマネジメント形成への取り組みが重要である。

第4節 まとめ

本章の第1節では、アセットマネジメントが社会基盤施設の管理において、相反関係下にある機能とコストのバランスを確保する目的と最適解決手法の理由をマネジメント論と対比して明確化した。そして、マネジメント体系では、ダブルループ（狭義的・広義的）構造による相互作用の意義をシステム論とマネジメント論から各ループ（マネジメントサイクル）の具体内容を踏まえて解説した。更に、マネジメントの期待効果では、マネジメント論の効率性と明証性の観点から、マネジメントの合理と合意の発現可能性とコミュニケーションの重要性を強調した。

第2節では、マネジメントの現状について、狭義的マネジメントと広義的マネジメントに区分して解説した。

狭義的マネジメントについては、専門技術との関係性を基本に効果（直接効果・間接効果）と対応（人的対応・物的対応）の視点から概説した。現状は、マネジメントの人的対応における専門技術による間接効果（支援機能）のマネジメントであることを明確化した。そして、今後は、専門技術が人的・物的対応での直接効果（代替機能）を担えるマネジメントに進展することが必要であることを明示した。

広義的マネジメントについては、マネジメント論の効率視点（物的視点・人的視点）から、資産・資源の効率化となるLCC型マネジメントと価値・制度の効率化となるNPM型マネジメントを対比して概説した。

第3節では、マネジメントの課題について、狭義的マネジメントと広義的マネジメントに区分して解説した。

狭義的マネジメントについては、PDCAサイクルの各段階での課題抽出を踏まえて、マネジメントの品質向上と定着確保が重要課題であることを明確化した。そのためには、マネジメントの可視的成果となる解析結果データをマネジメントツールとして活用することの重要性を強調した。

広義的マネジメントについては、組織体制・情報共有・環境対応の観点から、内外環境変化に対応した価値マネジメントの構築として、マネジメント関係者間の連携強化と情報共有が課題であることを明確化した。そのためには、マネジメント成果（アウトプット）の情報共有の必要性と成果プロセス（解析モデルや解析手法）をコミュニケーションツールとしたコミュニケーション活動が不可欠であることを強調した。

参考文献

- 1) 財務省：日本の財務関係資料，財務省編，2021.
<https://www.mof.go.jp/budget/fiscal_condition/related_data/202104_00.pdf（参照 2021-06-11）>
- 2) 財務省：統計表一覧，予算及び決算の分類，第19表（2）昭和24年度以降主（重要）経費別分類による一般会計歳出当初予算及び補正予算（昭和60年度～令和2年度）.
<<https://www.mof.go.jp/budget/reference/statistics/data.htm>（参照 2021-06-11）>
- 3) 国土交通省：国土交通省所管分野における社会資本の将来の維持管理・更新費の推計，インフラメンテナンス情報，社会資本の老朽化の現状と将来，2018.
<https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/_pdf/research01_02_pdf02.pdf（参照 2021-06-11）>
- 4) 青木洋一：多目的最適化手法，オペレーションズ・リサーチ—経営の科学—，Vol.23，No.8，pp.511-516，1978.
- 5) 岩根秀直，穴井宏和，屋並仁史：数値数式手法による多目的最適化，数理解析研究所講究録，Vol.1814，No.2，pp.142-147，2012.
- 6) 志水清孝：多目的最適化の理論と手法，電気学会雑誌，Vol.103，No.7，pp.677-680，1983.
- 7) 兼田敏之：多主体系のシステム論—問題解決方法論の基礎としての—，計測と制御，Vol.46，No.4，pp.312-318，2007.
- 8) 八木英一郎：制約条件の理論による多目的システムの改善，東海大学紀要政治経済学部，Vol.46，No.1，pp.131-142，2014.
- 9) 江藤肇：数理的システム理論の方法論的諸問題，科学哲学，Vol.7，No.1，pp.63-75，1974.
- 10) ジェラルド・M. ワインバーグ（松田武彦監訳，増田伸爾訳）：一般システム思考入門，紀伊國屋書店，1979.
- 11) フォン・ベルタランフィ（長野敬，太田邦昌訳）：一般システム理論，みすず書房，1973.
- 12) 島和俊：＜研究ノート＞最適システム論の形成をめざして—比較経済体制論の新しい方向—，三田学会雑誌，Vol.65，No.8，pp.552-560，1972.

- 13) 中辻卯一: <研究ノート> マネジメントとシステム理論(1), 關西大學商學論集, Vol.8, No.3-4, pp.287-308, 1963.
- 14) 井坂康志: 現代経営学とドラッカー—J.マチャレロ&リンクレターによるリベラル・アーツの概念を中心として—, ものづくり大学紀要, Vol.6, No.1, pp.1-7, 2015.
- 15) 板木雅彦: 複雑系と弁証法(上), 立命館国際研究, Vol.13, No.2, pp.29-42, 2000.
- 16) 板木雅彦: 複雑系と弁証法(上), 立命館国際研究, Vol.14, No.1, pp.91-106, 2001.
- 17) 平井孝治, 山本友太, 星雅丈, 川瀬友太, 奥山武生: 組織の価値実現過程—管理過程サイクルにおける PDCA の位置—, 立命館経営学, Vol.48, No.1, pp.49-67, 2009.
- 18) 井坂康志: ドラッカーにおけるフィードバックの概念, 立命館経営学, Vol.54, No.4, pp.165-176, 2016.
- 19) W. A. スピックス: マネジメント・セオリー—経営学説と最新の話題則—, 培風館, 2009.
- 20) 土木学会編: アセットマネジメント導入への挑戦, 技報堂出版, 2005.
- 21) 小澤一雅: 社会資本におけるアセットマネジメントの導入, 海洋開発論文集, Vol.22, No.1, pp.1-4, 2016.
- 22) 北山匡史: 社会インフラ設備のアセットマネジメント, システム/制御/情報, Vol.51, No.7, pp.300-305, 2007.
- 23) 大西淳也, 福元渉: PDCA についての論点の整理, PRI Discussion Paper Series, Vol.2016A, No.9, pp.1-33, 2016.
- 24) 大澤幸生: 知識マネジメント, オーム社, 2003.
- 25) 槇谷正人: ビギナーズ経営組織論, 中央経済社, 2018.
- 26) 柴直樹, 水上祐治: 経営情報システム入門, 日科技連, 2016.
- 27) 宮川豊章, 保田敬一, 岩城一郎, 横田弘, 服部篤史: 土木技術者のためのアセットマネジメント—コンクリート構造物を中心として—, 土木学会論文集 F, Vol.64, No.1, pp.24-43, 2008.
- 28) 小林潔司, 上田孝行: インフラストラクチャ・マネジメント研究の課題と展望, 土木学会論文集, No.444/IV-61 pp.15-27, 2003.
- 29) 国土交通省水管理・国土保全局下水道部: アセットマネジメントの基礎解説, 改正下水道法に基づく計画的な維持管理・更新にかかる研修テキスト, 2017.
<<https://www.mlit.go.jp/common/001184712.pdf> (参照 2021-06-11) >
- 30) 渡邊榮文: PDCA 考, アドミニストレーション, Vol.18, No.3-4, pp.391-405, 2012.

- 31) 岡部光明：品質改善の基本手法「PDCA (Plan-Do-Check-Act) サイクル」について－その有効性向上にとっての2つの核心－，明治学院大学国際学研究，Vol.47，No.1，pp.115-125，2015.
- 32) 井上和雄：マックス・ウェーバーにおける社会科学認識の客観性，大阪府立大学紀要（人文・社会科学），Vol.15，No.1，pp.169-181，1967.
- 33) 儘田徹：「客観性」再考－「現象学」的「客観性」論からみたマックス・ウェーバーの「客観性」概念－，慶応義塾大学大学院社会学研究科紀要社会学心理学教育学，Vol.23，No.1，pp.31-38，1983.
- 34) 平川秀幸：G. バシュラールの心理学主義への一視角－客観性の実践的基礎の探求としての心理学主義－，科学基礎論研究，Vol.24，No.2，pp.59-65，1997.
- 35) 安川一：「心的なものの定義」：主観性をめぐって－G.H.ミード「行為の哲学」に向けて（その1）－，一橋研究，Vol.11，No.1，pp.83-107，1986.
- 36) マーガレット・S. アーチャー，佐藤春吉訳：主観性の存在論的位置－構造とエイジェンシーをつなぐ失われた環－，立命館大学人文科学研究所紀要，Vol.104，No.1，pp.149-177，2014.
- 37) 藤野陽三，川井豊：土木鋼構造分野における構造工学の変遷と今後の課題，構造工学論文集，土木学会，Vol.57A，2011.
- 38) 内閣府戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」：SIP インフラ連携委員会報告 社会インフラの維持管理・更新・マネジメントに関わる新技術の開発と活用拡大を考える－取組みと提言－，土木学会技術推進機構，SIP インフラ連携委員会，2019.
<https://committees.jsce.or.jp/opcet_sip/system/files/SIP_tec_report.pdf（参照 2021-06-11）>
- 39) 宮本文穂，河村圭，中村秀明：Bridge Management System(BMS)を利用した既存橋梁の最適維持管理計画の策定，土木学会論文集，No.588/VI-38，pp.191-208，1998.
- 40) 河村圭，宮本文穂，中村秀明，小野正樹：Bridge Management System(BMS)における維持管理対策選定システムの開発，土木学会論文集，No.658/VI-48，pp.121-139，2000.
- 41) 笠原篤：舗装マネジメントシステム，土木学会論文集，No.478/V-21，pp.1-12，1993.
- 42) 江橋正敏，中村裕司，小澤一雅：資産運用に着目した社会資本のアセットマネジメント，建設マネジメント研究論文集，Vol.12，No.1，pp.333-342，2005.
- 43) 湯浅孝康：評価基準としての‘Efficiency’概念－行政学からのアプローチ－，日本評価学会日本評価研究，Vol.12，No.1，pp.27-41，2012.

- 44) 宮廻甫允：環境変化と経営管理の変革，鹿児島大学経済学論集，Vol.78，No.1，pp.67-89，2012.
- 45) 幸田浩文：経営管理思想にみる研究アプローチの多様性（1）－バーリ＝クンダの管理イデオロギー波動論を中心として－，東洋大学経営論集，Vol.53，No.1，pp.129-143，2001.
- 46) 西垣泰幸，坂本真子，朝日幸代，中村玲子，藤澤宜広：公共経済学入門，八千代出版，2003.
- 47) 横山正樹：海外における社会資本のアセットマネジメントの取り組みについて，月刊自治フォーラム，2007.
- 48) FHWA：HANDBOOK FOR INCLUDING ANCILLARY ASSETS IN TRANSPORTATION ASSET MANAGEMENT PROGRAMS，FHWA，2019.
<<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/19068/19068.pdf>（参照 2021-07-10）>
- 49) National Audit Office：Highways Agency Contracting for Highways Maintenance，The Stationary Office，2009.
<<https://www.nao.org.uk/report/highways-agency-contracting-for-highways-maintenance/>（参照 2021-07-10）>
- 50) 国土交通省編：平成 27 年度版国土交通白書，日経印刷，2015.
- 51) 金澤文彦：AI・ICT を活用した道路橋診断技術の開発，土木研究所講演会講演集，土木研究所資料第 4406 号，pp.1-6，2020.
- 52) 澤田道夫：地方政府における行政組織の意思決定をめぐる基礎理論的研究－自治効率の観点から見た来るべき協治社会の展望－，熊本県立大学大学院博士論文，pp.1-228，2009.

第3章

狭義的観点からの提案

第3章 狭義的観点からの提案

第1節 提案モデル概要

1. 1 提案条件

第1章では、アセットマネジメントの特性を社会性・全体性・公平性・一般性の保有とした¹⁾⁸⁾。そして、これらの特性からの最適マネジメントとは、時間空間的变化と変容進化する実用価値を確保したものであった。

第2章では、狭義的マネジメントの主要課題は、マネジメント成果（アウトプット）となる解析結果データの有効活用による品質向上であった。また、解析結果データは、マネジメントの重要ツールであり、その有効活用には、解析プロセス（解析モデルや解析手法）の理解が不可欠であった。そして、解析プロセスは、データ内容に応じた簡易性とデータ変化に対応可能な拡張性を有することが課題であった。

これらを踏まえて、本章では、上記課題の具体手法として、マネジメント特性を踏まえた解析プロセスを提案するものである。ここでの解析プロセスとは、資産の状態解析（劣化解析・健全度解析）モデルとその手法である。

なお、提案条件は、次の①～⑥とおおりである。

- ① マネジメントの最適性から、空間要因の差異性より類似性優位における時間変化主体の範疇とする⁷⁾⁹⁾。
- ② マネジメントの活用範囲を踏まえて、維持管理費用や更新費用が大きい道路を対象分野とする^{10),11)}。
- ③ 一般システム論的思考から、全体系の道路構造物の付帯施設を単純系の施設の組み合わせと考えるものとする¹²⁾⁻¹⁴⁾。
- ④ 全体系の複雑化促進として、全体系を多体単純系からの複雑構造とする¹⁴⁾。
- ⑤ ④の条件から、トンネル照明設備の照明灯具を対象物とする。
- ⑥ ⑤と設備機能発現の条件から、トンネル照明設備が設置されているトンネルを全体系とする。

1. 2 アセットマネジメント関連の既往研究

アセットマネジメント関連の研究では、状態予測（劣化予測・健全度予測）や状態予測から補修まで含めた研究がある。本論文の対象分野である道路では、橋梁等の構造物をはじめ舗装や付帯物としての施設設備におけるものがある。

まず、状態予測の研究では、点検結果から劣化評価や寿命推定をしたものがある。その中では、貝戸らの研究で、橋梁の目視検査データを用いて、劣化速度から平均劣化曲線の算出方法を検討したものをはじめ、劣化速度を確率変数と捉えてマルコフ連鎖モデルによるものがある^{15),16)}。その後の研究では、部材や利用状態等の特性を考慮した劣化過程として、トンネル照明設備を対象にハザードモデルを適用した劣化予測手法等を提案している¹⁷⁾⁻²⁰⁾。また、竹田らも橋梁の点検データからマルコフ確率モデルにより健全度予測をしている²¹⁾。河村らや古田らは、GA (Genetic Algorithm) を用いた BMS により、橋梁の劣化予測を示している^{22),23)}。

次に、状態予測から補修関係まで含めた研究では、古田らや宮本らが GA を用いた BMS により、橋梁の劣化予測から補修費用の経済性を考慮したものを示している²⁴⁾⁻²⁶⁾。GA による劣化予測では、近田らが 200 以上の橋梁群を対象に、劣化予測から補修費用シミュレーションをして経時的均等化を提案している²⁷⁾。小林らや宮崎らは、舗装を対象に混合マルコフ過程モデルを用いて、LCC (Life Cycle Cost) 最適化から補修策や期待寿命を示している^{28),29)}。谷口らは、舗装データベースを活用して、正規分布モデルの解析による路面のひび割れ等の供用性曲線から LCC を算出している³⁰⁾。

また、施設を対象とした研究では、道路のトンネル照明設備をはじめ、下水道の地中埋設コンクリート構造物、栈橋および消波工のような港湾・海岸施設でもマルコフモデルやワイブルハザードモデル、正規分布モデル、およびモンテカルロモデルを用いて、劣化予測からのリスクや LCC による最適補修を示したものがある³¹⁾⁻³⁷⁾。

海外の研究では、Frangopol, D. M.らによるモンテカルロ法や一次近似二次モーメント法をはじめマルコフモデルやガンマ分布モデルによる各種確率モデルでの橋梁の劣化予測と維持管理費用の最適モデルを検討している³⁸⁾。また、舗装の劣化モデルでは、Shin, H.C.らによるハザードモデル等がある^{39),40)}。特に、LCC モデルに関する研究では、各年交換モデルと集中交換モデルに対して維持管理費用における割引による現在価値やキャッシュフローを含めて検討したものがある⁴¹⁾。また、橋梁部の道路利用者観点の費用である運転費・燃料費・維持費と事故損失費・労働損失費を含めた橋梁の維持管理費用便益分析手法を検討したものがある⁴²⁾。

このように、状態予測やその補修関連の研究では、状態予測モデル（劣化予測モデル・健全度予測モデル）やそのモデルを用いた状態予測から補修費用最適化までの研究が、幅広く行われている。しかし、これらの状態予測モデルは、状態予測の算出方法が高度であるため、解析プロセスの可視化が難しいものとなっている。これには、狭義的マネジメントの観点で、点検結果データとマネジメントからの課題が存在している。まず、点検結果データの課題は、データが限定された僅少データにおける状態予測の算出が難しいというものである。次に、マネジメントの課題は、マネジメント関係者（管理者・実務者）が混在する現場での運用展開が難しいというものである。

これらより、既往研究において、このような狭義的マネジメントの課題対応の観点から状態予測モデルを取り扱った事例の研究は、比較的少ない状況である。

1. 3 提案モデル概要

本章では、前述の前提条件や既往研究を踏まえ、第2章での狭義的マネジメントの課題に対応できる解析プロセス（解析モデル・解析手法）としての状態予測モデル（健全度予測モデル）を提案する。

また、提案にあたっては、マネジメント進化に対応可能なものを検討する。一般に、アセットマネジメントは、導入期（初期段階）から定着期（成長段階）までに具体内容が大きく進化するものである。導入期では、データの僅少性から簡易的手法での状態予測で、PDCA サイクルの基本的な体系化を実現する。定着期では、データ蓄積によって状態予測の精度向上が可能となり、マネジメントの品質向上を図るものである。

この提案モデルは、上記のマネジメント導入期と定着期に対応できるものである。マネジメント導入期では、点検結果等のデータ量が限定されて僅少な場合でも、マネジメント関係者が解析プロセスを確認・活用できるものである。また、マネジメント定着期では、データ蓄積内容（質や量）にあわせた解析プロセスを可能とするものである。この提案モデルは、マネジメントツールとして活用するものである。このマネジメントツールとしての活用は、狭義的マネジメントの課題対応とあわせて、マネジメントにおいてボトムアップから螺旋（スパイラル）的に向上することが期待できるものである。

一般に、数理モデルは、大きく決定論的モデルと確率論的モデルに分類される⁴³⁾⁴⁵⁾。決定論的モデルとは、初期条件を設定すると微分方程式等により、一意的に予測結果が決定できるものである。確率論的モデルとは、確率変数を有し、予測結果がランダムに発生するものである⁴³⁾⁴⁵⁾。

社会基盤施設は、同仕様であっても施工時や施工後における現地の環境要因等により、その後の状態に差異が発生する場合がある。この差異は、状態予測における結果のランダム性に相当するものである。このため、社会基盤施設の状態予測では、確率論的モデルを活用している場合が既往研究からも多い傾向である。社会基盤施設の中でも、道路構造物の付帯施設は、施設の機器や機材を工場内製作する 경우가多く、施設の設置のみを現地で施工するものである。このような施工による施設では、施工時における環境要因等による状態差異のランダム性は小さいため、施工後の設置環境によるランダム性を中心に考慮すればよいと想定される。特に、本研究対象であるトンネル照明設備は、トンネル内に設置されていることから、トンネル毎の環境に起因することが想定される。これらより、トンネル照明設備の状態予測では、トンネルの環境が同類となるものを統計集団とすることで、予測結果のランダム性と点検結果データの僅少性を解消することを可能としたものである。

上記の取り扱いを踏まえて、この提案モデルは、決定論的モデルを適用するものである。

一般に、トンネル照明設備の灯具は、状態予測に活用する点検データが、数年周期で数回程度という観測期間が限定されたものであるため、データ量的にも僅少なものである。また、トンネル照明設備の更新は、トンネル単位を基本にして計画される。これは、散在化する設備の更新を実施するよりもトンネル単位で設備更新を実施する方が、更新作業等において効率的であり、経済的であることが理由となっている。このため、設備更新の計画策定には、トンネル単位での状態予測が必要である。トンネル単位での扱いは、トンネル照明設備がトンネル内視環境を設置された全設備による機能で確保されている施設機能的観点からも整合している。これらの背景から、データ処理上での簡易性と僅少性は、設備更新の基本であるトンネル単位を簡易的に全体系（以下、「系」と呼ぶ）とした。また、時間変化する状態確率の動的変化は、個々のトンネル照明設備の灯具ではなく、この系のマクロ的統計集団とした取り扱いによって克服した。そして、この系の状態確率の動的変化は、マルコフ確率過程上の時間状態変動としてのマスター方程式による決定論的モデルによりモデル化をした。これにより、このモデルは、マスター方程式を解法して算出された状態確率から、トンネル単位でのトンネル照明設備の状態予測を可能としたものである。

本論文で、この状態予測モデルは、マルコフ連鎖モデルを基本とした簡易動的マクロモデル（以下、「本モデル」と呼ぶ）と定義する。前述の既往研究における種々の状態予測モデルと本モデルとは、大きな相違点がある。それは、既往モデルが確率論的モデルによって、個々の設備状態を基本単位として取り扱うのに対して、本モデルは、決定論的モデルによって、設備更新の基本となるトンネル単位を簡易的に系とし、マクロ的な動的変化として取り扱うことである。この簡易的な扱いは、現場における収集可能なデータ量の僅少性対応とマネジメント関係者にも活用できる状態予測を可能とするものである。

第2節 対象施設概要

2. 1 トンネル照明設備の機能と構造

トンネル照明設備は、次の2点の機能を確保している。第1点目の機能は、トンネル内外に進入出する車両の運転者に対してのトンネル内外での視環境格差の緩和である。具体には、トンネルの外から内に進入する車両の運転者に対する暗順応解消と、トンネルの内から外に進出する車両の運転者に対する明順応解消の機能である。第2点目の機能は、トンネル内走行の車両の運転者に対しする視認性の確保である。具体には、トンネル内の障害物や他車両の認識のための運転者に対する視覚上の輝度を満足させて、安全走行を可能にするための機能である。

トンネル照明設備は、トンネル内に定間隔で設置されており、その間を点滅のための電源や制御配線が敷設されている。また、制御設備は、トンネル外の明るさに応じて、トンネル内の明るさや点滅を制御している。このように、トンネル照明設備は、トンネル内の全照明設備と電力供給や制御運用する配線設備や制御設備によって、上記の機能を確保している。

トンネル内に設置された個々のトンネル照明設備の構造は、**図-3.1** 及び **図-3.2** に示す形状で、トンネル内の壁面に取付られており、照明灯具、ランプ、安定器から構成される。照明灯具は、ランプの配光を制御する機能を有するものであり、灯具の外郭部分の筐体、ランプソケット、ランプの配光をする反射鏡、灯具からの光を透過させるためのガラス製の透光性カバー、及び灯具と壁面を固定する取付部等から構成される。筐体および取付部は、同材質で構成されており、すきま腐食、応力腐食および異種金属同士の接触による電蝕防止等を配慮した耐食性に優れたものとなっている。**写真-3.1** には、トンネル照明設備のトンネル壁面に設置された写真を示す。

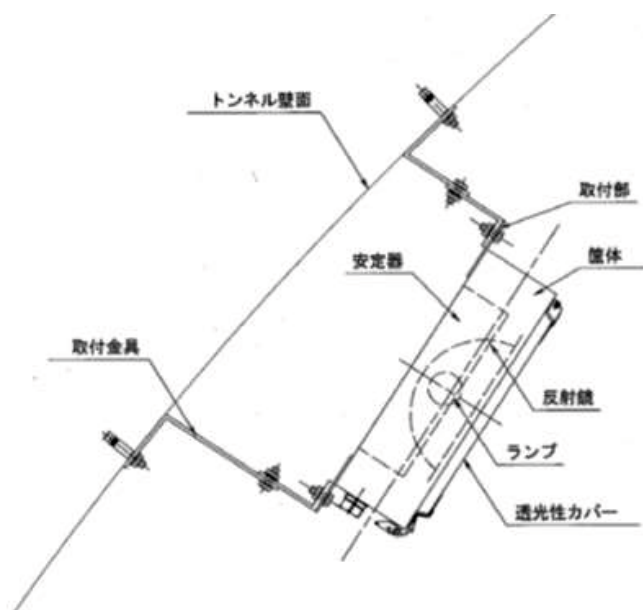


図-3.1 トンネル照明設備構造側面図

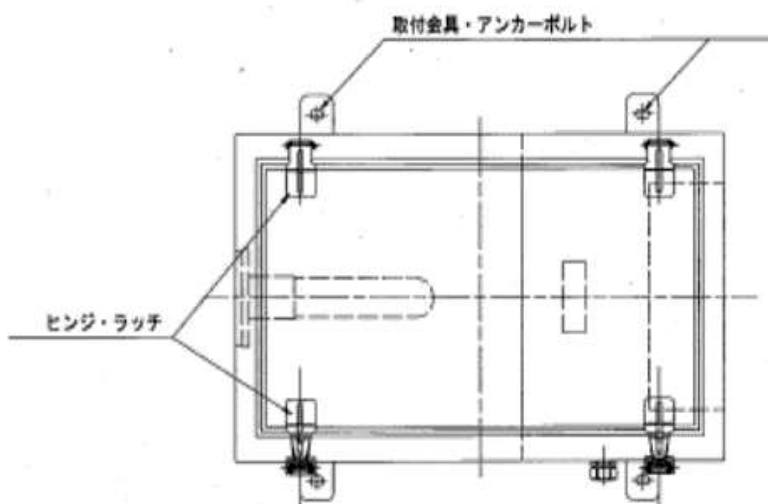


図-3.2 トンネル照明設備構造正面図



写真-3.1 トンネル照明設備

トンネル照明設備の材質は、1990年中頃以前は冷間圧延鋼を材料とする鋼製（以下、「鋼板製」と呼ぶ）のものが主流であったが、その後は、トンネル内の湿水や路面凍結防止剤の残着による腐食や発錆を考慮した冷間圧延ステンレス鋼を材料とするステンレス鋼製（以下、「ステンレス鋼板製」と呼ぶ）が主流となっている。ただ、腐食や発錆の状況は、設備の材質やトンネル内の設置環境で異なるが、設置後の経過年数とともに進行するため、劣化状況把握のための定期的な点検とその点検結果による状態予測を基本とした予防保全対応の実施が重要である。

第3節 対象施設点検概要

3. 1 点検種別と対象点検

トンネル照明設備の点検は、一般的に「日常点検」、「詳細点検」、及び「定期点検」から成り立っている。各点検の概要は、表-3.1に示す。

日常点検は、目視等の五感により、点滅や配線の機能面と灯具の腐食や損傷の構造面の状態を確認するものである。日常点検は、設備点検の基本となるもので、詳細点検や定期点検を補完し、その点検対象の抽出にも寄与するものである。

詳細点検は、点滅や明るさを踏まえた設備の電源や制御の状態を各種測定器により、輝度測定や絶縁測定等で機能確認するものである。

定期点検は、灯具本体、取付金具、アンカーボルトと設置部のコンクリートまで含めた状態について、近接目視や触手により、腐食や損傷の構造的な確認をするものである。

これらの点検内容から、本論文では、トンネル照明設備における構造上の状態予測をするため、構造的な劣化等の状態が確認できる「定期点検」の点検結果を状態予測の対象データとした。

表-3.1 点検種別と点検概要

点検種別	点検概要
日常点検	点検実施者が目視等により、外観から設備の機能や構造の状態を確認する
詳細点検	点検実施者が設備内部まで詳細に確認し、測定器等で定量計測確認をすることにより、機能状態を確認する
定期点検	点検実施者が近接目視や触手により、設備の構造的な損傷や劣化等の状態を確認する

3. 2 点検手法

定期点検の方法は、実務経験豊富な点検実施者がトンネル照明設備に近接して、目視や触手等による感性経験を活用しながら変状状況の検査を実施する。変状とは、損傷や劣化等の進行である。一般に、定期点検の頻度は、対象となるトンネルを数区分に分割し、区分毎のトンネル照明設備を数年周期で点検を実施する。図-3.3には、トンネルを3区分に分割し、3年周期で実施した場合の具体的な実施方法を図示する。

点検の部位は、トンネル照明灯具本体（筐体部）、取付部のアンカーボルト等の金具類、並びに照明灯具の透光性カバー開口部における丁番等のヒンジやラッチ等が対象となっている。図-3.4には、劣化状況が著しいことから、点検を実施する上で注視する具体的な位置を網掛部で図示する。

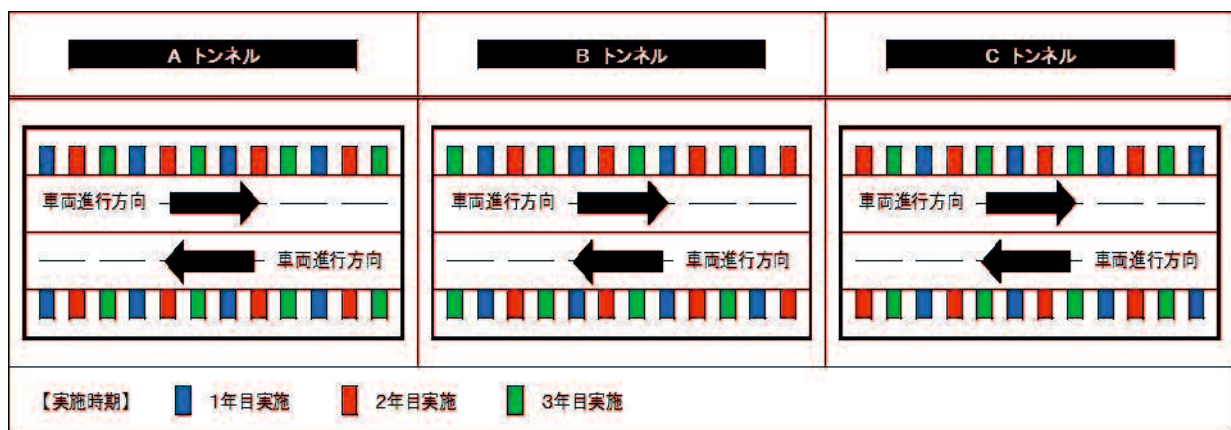


図-3.3 点検実施区分図

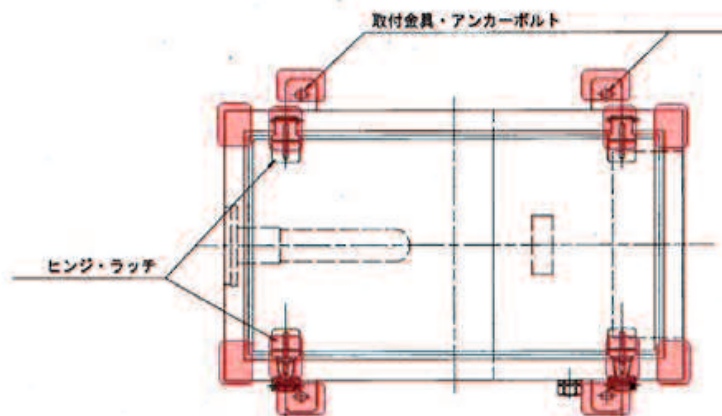


図-3.4 点検部位詳細図

3. 3 点検判定

一般に、定期点検の判定では、金属の腐食状況、亀裂やひび割れ、及び落下の危険性等から点検対象物の損傷、劣化、進行度、及び補修対策の必要性について、点検マニュアル等にある発生状況の写真等を参考基準として判定することで、点検評価結果のバイアスを抑えることができる。

定期点検の判定単位は、トンネル照明灯具本体（筐体部）、照明灯具の透光性カバー開口部における丁番等のヒンジやラッチ等、灯具取付部のアンカーボルト等の金具類、およびコンクリート設置部の部位毎に行うことにより、詳細な劣化等の状態把握が可能となる。

本論文では、トンネル照明設備の基本となる判定区分は、表-3.2のとおり4段階（*A・B・C・D*）判定とし、部位毎の詳細な判定区分は、表-3.3のとおり損傷や腐食等の状態に応じた補修の程度により4段階（*a・b・c・d*）とする。また、トンネル照明設備全体の判定は、各部位とも安全性に影響することを考慮して各部位判定の中で最低段階のものを評価結果とする。例えば、各部位の点検評価結果が灯具部:*b*、取付部:*b*、アンカー部:*b*、コンクリート設置部:*c*の場合には、トンネル照明設備全体の点検評価結果は、部位での評価結果が最低段階の*C*となる。

点検実施者は、これらの基準により、部位単位を基本とした設備全体の判定を状態に応じて感性的に実施する。

表-3.2 点検判定区分表

判定区分	判定内容
<i>D</i>	損傷や腐食等が見受けられ、構造的機能低下も著しいため、緊急に補修等の必要がある状態
<i>C</i>	損傷や腐食等が見受けられ、構造的機能低下もみられるため、補修等の必要がある状態
<i>B</i>	損傷や腐食等は見受けられるが、構造的機能低下がみられないため、補修等の必要がない状態
<i>A</i>	損傷や腐食等は見受けられない状態

表-3.3 点検判定詳細区分表

点検部位	判定基準			
	<i>d</i>	<i>c</i>	<i>b</i>	<i>a</i>
灯具部	灯具部の損傷や腐食等が広範囲に見受けられ、構造的機能低下が著しく緊急に補修等の必要がある	灯具部の損傷や腐食等が広範囲に見受けられ、構造的機能低下による補修等の必要がある	灯具部の損傷や腐食等が見受けられるが、構造的機能低下のための補修等の必要がない	灯具部の損傷や腐食等が見受けられない、または軽微である
取付部	取付部の損傷や腐食等が広範囲に見受けられ、構造的機能低下が著しく緊急に補修等の必要がある	取付部の損傷や腐食等が広範囲に見受けられ、構造的機能低下による補修等の必要がある	取付部の損傷や腐食等が見受けられるが、構造的機能低下のための補修等の必要がない	取付部の損傷や腐食等が見受けられない、または軽微である
アンカー部	アンカー部の損傷や腐食等が広範囲に見受けられ、構造的機能低下が著しく緊急に補修等の必要がある	アンカー部の損傷や腐食等が広範囲に見受けられ、構造的機能低下による補修等の必要がある	アンカー部の損傷や腐食等が見受けられるが、構造的機能低下のための補修等の必要がない	アンカー部の損傷や腐食等が見受けられない、または軽微である
コンクリート設置部	設置部周辺でコンクリートのひび割れ等が広範囲に見受けられ、構造的機能低下が著しく緊急に補修等の必要がある	設置部周辺でコンクリートのひび割れ等が広範囲に見受けられ、構造的機能低下による補修等の必要がある	設置部周辺でコンクリートのひび割れ等が見受けられるが、構造的機能低下のための補修等の必要がない	設置部周辺でコンクリートのひび割れ等が見受けられない、または軽微である

このように、定期点検の結果は、段階評価 ($A \cdot B \cdot C \cdot D$) であるため、このままでは定量的な現状の劣化把握や今後の状態予測をすることはできない。このため、この段階化された離散的な評価結果は、連続的な健全度等の定量データ (0%~100%) へと変換することで、本モデルへの活用が可能となる。

そのためには、表-3.2 に示される損傷や劣化等の点検評価結果における感性的な段階判定基準と整合した定量的な健全度 (0%~100%) の設定が必要となる。この健全度は、本モデルによる現状の状態把握や今後の状態予測の活用への基礎となるものである。

3. 4 点検結果のデータ内容

定期点検結果のデータベースには、点検関係とあわせて点検対象となる設備関係の諸元等が必要である。まず、設備関連では、設備の設置場所と履歴である。設置場所は、設置されている道路、トンネル、設備区分（番号等）、位置（トンネル内位置等）である。設備履歴は、設置年月、補修更新年月、補修更新内容である。次に、点検関連では、点検の実施内容と結果等である。点検実施内容は、実施の時間（年月日時）、天候、実施者である。結果等は、点検結果、所見（設備状態や環境状況等での追記事項）、前回点検結果との比較（設備状態や環境状況での追記事項）である。これらのデータ内容は、点検時の判定におけるバイアスの排除と点検データ解析の精緻化に寄与するものである。更に、データベースには、点検時の設備状況や環境状況の画像と各判定区分の基準となる設備画像を保有することも必要である。これは、点検実施と点検データ解析の双方の観点で有益である。点検実施の観点では、判定基準画像や過去状況画像からの可視的確認と点検後の振り返りによる見直し修正が可能となるため、点検結果の精度向上が期待できるものである。点検データ解析の観点では、解析結果による状態予測に対する状態の可視的検証が可能となり、解析モデルの見直しや修正が可能となるため、データ解析の精度向上も期待できるものである。このようなデータベースは、点検やデータ解析において基本となるものであるが、データ解析には、解析用データベースへの再形成が必要である。

解析用データベースは、上記の基本となるデータベースから必要なデータ項目を抽出して形成する。その必要となるデータ項目は、直接移行するものと間接移行（データ転換）するものに区分される。直接移行と間接移行ともそのデータ項目には、設備関連と点検関連の双方がある。直接移行は、設備関連での設置場所の全項目（道路、トンネル、設備区分、位置）、及び、点検関連で点検実施時間と点検結果である。間接移行は、設備履歴の設置年月と補修更新年月、及び点検関連の点検実施時間である。この間接移行では、点検実施時間と設置年月（更新を実施した場合は、更新年月）から設備の経過時間（年月）を算出する。また、点検実施時間から詳細な点検間隔（年月）も算出可能となる。これらから、解析用データベースは、直接移行した設備の設置場所の全項目（道路、トンネル、設備区分、位置）、点検実施時間、点検結果、及び、間接移行した経過時間で形成される。この解析用データベースの再形成は、点検時間と結果の履歴による点検間隔での状態遷移の算出を可能とし、本モデルを活用するための必要データを揃出することになる。本モデルは、この解析用データベースを活用して解析を実施するものである。

第4節 健全度予測手法

4. 1 健全度予測モデル

本モデルは、点検や設備更新の現場レベルでの実用性にも配慮したもので、定量的な健全度を指標に劣化等の状態予測をする健全度予測モデルである。この現場レベルでの実用性とは、点検結果データと設備更新計画における円滑な対応である。

まず、実際の点検結果データは、電子データによるデータベースの構築から期間がまだ浅い場合や点検周期が数年であるためデータ蓄積に時間を要する場合等から、データ量が限定された僅少データである。また、設備更新は、散在化する劣化設備の更新よりもトンネル単位で設備更新する方が、更新の作業面や費用面からも効率的で経済的である。更に、設備の機能では、トンネル単位となる全設備で、運転者の視環境が確保されている。このような実用性や機能性を踏まえた理由から、簡易的な健全度予測モデルでは、トンネル単位を系とみなすマクロモデルの検討が必要となる。

一般に、マクロの基本は、統計物理学での平衡状態のマクロ的統計集団に起因する^{46),47)}。平衡状態では、統計集団の等価性から、マクロ的統計集団は、ミクロ要素の集合体であるため、マクロ的統計集団の状態は、任意のミクロ要素の状態確率から追跡することができる^{46),47)}。これらから、マクロモデルは、平衡状態とした個々のミクロ的要素からなる統計集団と考えられる。

本モデルは、個々のトンネル照明設備の状態を平衡的なミクロ的要素とし、その要素からなるトンネル単位を系として簡易的に捉えるマクロモデルとした。この系でのトンネルの状態は、そのミクロ的要素のトンネル照明設備の状態から、マルコフ連鎖モデルによって予測することで追跡可能である。しかし、実際のトンネル照明設備は、材質や設置環境によって、劣化状態も異なることが想定されるため、社会統計学での統計集団概念における形式的同種性の観点から同種性を基礎づける概念である標識による共通性を適用する⁴⁸⁾⁻⁵²⁾。本モデルの共通性となる標識の適用には、次の3点に配慮した。

第1点目は、材質の仕様における統一化である。前述のとおりトンネル照明設備の灯具の材質は、鋼板製とステンレス鋼板製との区分はあるため、材質の仕様を統一する。

第2点目は、設置されている材質の統一化である。実際のトンネル照明設備の設置では、緊急対応として劣化や損傷が著しい設備のみを更新する場合がある。その場合には、更新後と更新前の材質仕様が異なったときに、トンネル単位で材質仕様が混在することとなる。

このため、トンネル単位で鋼板製かステンレス鋼板製の材質で統一され、材質が混在した設置状況でないものとする。

第3点目は、設置環境における同質化である。トンネル照明設備は、降雪地での路面凍結防止剤の使用による残着で劣化が進行する傾向にある、このため、トンネル照明設備の設置環境は、地域限定をすることにより、トンネル単位での設置環境に差異がないものとする。

この3点の標識を適用することで、マルコフ連鎖モデルの適用限界である部材や利用状態等の特性の反映は、近似的に同等化（平衡化）した。これによって、本モデルは、取り扱いが簡便なマルコフ連鎖モデルの適用を可能としたものである。

しかし、今後は、データ量の確保に伴って、劣化要因の影響も明確化することが予想される。例えば、設置環境地域となる内包性が、海岸地域や山岳地域のような外延性で、塩害による相違がある場合には、塩害影響による地域区分の分類標識を追加した同質化の確保が必要とされる。また、長大トンネル（延長が長いトンネル）では、トンネル内の湿水や路面凍結防止剤の残着による影響によって、トンネル内区間（入口部・中間部・出口部）で劣化に相違が発生することも想定される。このような場合には、トンネル内における同環境で区間化した単位への変更による同質化の確保が必要とされる。このように、統計集団における同質化の確保は、データ量の確保による解析結果の精緻化と連応しており、螺旋的なマネジメントによって、同種統計集団を基礎づける標識や単位も進化していくものである。

このような同質性（平衡性）が確保された統計集団でのトンネルの状態を決定する本モデルは、マルコフ確率過程を前提とした離散的に時間変動するため、状態変数値も点検観測時点を初期値として時間離散が1年で時間変動する動的モデルである。このため、状態確率を1年単位の連続関数として取り扱うものである。これらから、本モデルの状態は、トンネル照明設備の状態 i の初期状態確率 $P_i(0)$ と状態 i から状態 j への時間離散的な遷移確率 $P_{i \rightarrow j}$ によって、マルコフ確率過程上での状態変数の動的変化をマクロ的な確率束の流入と流出の差分から決定する。これには、時間変動を捉えるマスター方程式を用いて、それを解法することによって時間的な状態変動を決定できる。

上記より、本章では、定期点検のデータから、トンネル単位でのトンネル照明設備健全度を予測する本モデルの各種マネジメントへの適用性を次の2点で検討する。

第1点目は、本モデルの状態予測による基本マネジメントにおける実用性である。

第2点目は、本モデルの補修対応・地震リスク対応の応用マネジメントへの拡張性である。

4. 2 健全度算出手法

本モデルでのトンネル照明設備の健全度を算出する手法は、**図-3.5** のとおり STEP1～STEP5 の5段階で構成される。

STEP1 は、点検結果の各段階 ($A \cdot B \cdot C \cdot D$) を初期値の健全度 (基準健全度) を設定するため、この離散的な点検結果を健全度である連続的な定量データ (0%～100%) 結果に変換する。この変換には、点検実施者の感性と定量データとの整合性を十分にとるため、各トンネルで定期点検を実施している複数の点検実施者に対して各段階 ($A \cdot B \cdot C \cdot D$) の健全度について 0%～100%の定量化ヒアリングを実施して設定した。

STEP2 は、マルコフ過程における状態変化を状態 i から状態 j への遷移として捉えた場合の遷移確率 $P_{i \rightarrow j}$ は、次の2パターンを基本とする。

- ・ 状態保持 (状態 i から状態 j への遷移) $P_{i \rightarrow i}$ ($i=j, j$ は i と同状態)
- ・ 隣接遷移 (状態 i から隣接状態 j への遷移) $P_{i \rightarrow j}$ ($i \neq j, j$ は i の隣接状態)

これより、各状態における遷移確率のパターンは、**表-3.4** とした。

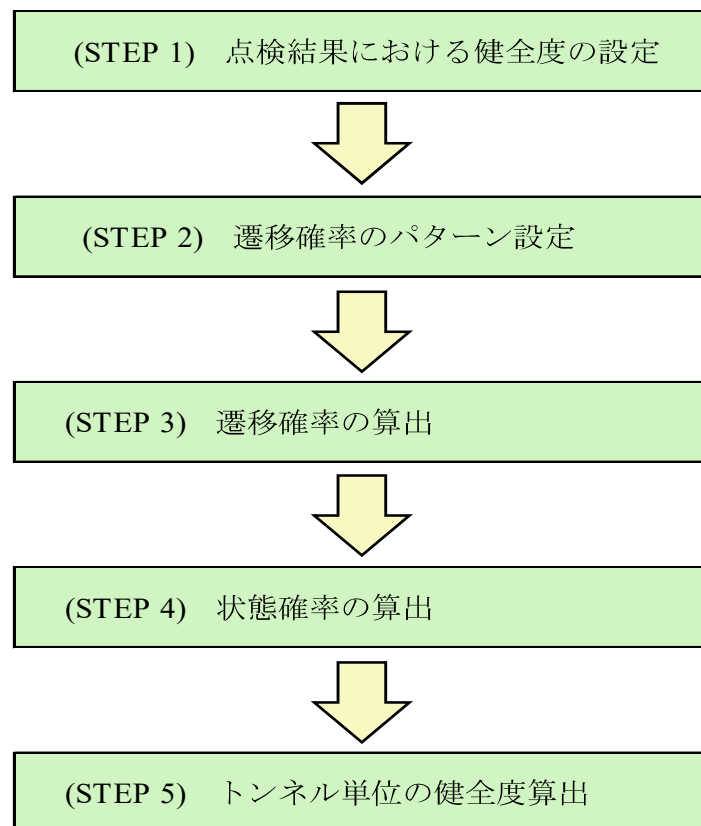


図-3.5 健全度算出フロー図

表-3.4 遷移確率パターン表

パターン	初期状態 i	最終状態 j	遷移確率 $P_{i \rightarrow j}$
1	A	A	$P_{A \rightarrow A}$
2	A	B	$P_{A \rightarrow B}$
3	B	B	$P_{B \rightarrow B}$
4	B	C	$P_{B \rightarrow C}$
5	C	C	$P_{C \rightarrow C}$
6	C	D	$P_{C \rightarrow D}$

STEP3 は、STEP2 でパターン（状態保持と隣接遷移を基本）設定した状態 i から状態 j への遷移確率 $P_{i \rightarrow j}$ を状態 i における初期数量 B_i と最終数量 A_i から次式のとおり算出する。

$$P_{i \rightarrow j} = \left| \frac{(A_i - B_i)}{B_i} \right| \quad (3.1)$$

$$P_{i \rightarrow i} = 1 - P_{i \rightarrow j} \quad (3.2)$$

これより、遷移確率行列 \mathbf{P} は、 $P_{ij} = P_{i \rightarrow j}$, $P_{ii} = P_{i \rightarrow i}$ ($i = A, B, C, D$) とすると、状態保持と隣接遷移からなる次のような行列となる。

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} P_{AA} & P_{AB} & 0 & 0 \\ 0 & P_{BB} & P_{BC} & 0 \\ 0 & 0 & P_{CC} & P_{CD} \\ 0 & 0 & 0 & P_{DD} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

STEP4 は、マルコフ過程上における状態変化として、状態 i の状態確率 P_i ，状態 j の状態確率 P_j ，および状態 i から j への遷移確率 $P_{i \rightarrow j}$ から、次式のマスター方程式により、各状態確率 P_i ，($i=A, B, C, D$) を算出する。なお、マスター方程式は、次式で示される。

$$\frac{dP_m}{dt} = \sum_k (P_m \cdot P_{k \rightarrow m}) - \sum_k (P_m \cdot P_{m \rightarrow k}) \quad (k \neq m) \quad (3.4)$$

式(3.4)より各状態確率 P_i ，($i=A, B, C, D$) のマスター方程式は、次のとおりである。

$$\frac{dP_A}{dt} = -P_A \cdot P_{A \rightarrow B} \quad (3.5)$$

$$\frac{dP_B}{dt} = P_A \cdot P_{A \rightarrow B} - P_B \cdot P_{B \rightarrow C} \quad (3.6)$$

$$\frac{dP_C}{dt} = P_B \cdot P_{B \rightarrow C} - P_C \cdot P_{C \rightarrow D} \quad (3.7)$$

$$\frac{dP_D}{dt} = P_C \cdot P_{C \rightarrow D} \quad (3.8)$$

上記の式(3.5)から式(3.8)を解法し、各状態確率 P_i ，($i=A, B, C, D$) は、次式で示される。

$$P_A(t) = P_A(0) \cdot \exp\left(-\int_0^t P_{A \rightarrow B} dt\right) \quad (3.9)$$

$$P_B(t) = \frac{P_{A \rightarrow B}}{P_{B \rightarrow C} - P_{A \rightarrow B}} \cdot P_A(0) \cdot \exp\left(-\int_0^t P_{A \rightarrow B} dt\right) + \left(P_B(0) - \frac{P_{A \rightarrow B}}{P_{B \rightarrow C} - P_{A \rightarrow B}} \cdot P_A(0)\right) \cdot \exp\left(-\int_0^t P_{B \rightarrow C} dt\right) \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned}
 P_C(t) = & \left[\frac{P_{B \rightarrow C} \cdot P_{A \rightarrow B}}{(P_{C \rightarrow D} - P_{A \rightarrow B}) \cdot (P_{B \rightarrow C} - P_{A \rightarrow B})} \cdot P_A(0) \right] \cdot \exp\left(-\int_0^t P_{A \rightarrow B} dt\right) \\
 & + \left[\frac{P_{B \rightarrow C}}{P_{C \rightarrow D} - P_{B \rightarrow C}} \cdot \left(P_B(0) - \frac{P_{A \rightarrow B}}{P_{B \rightarrow C} - P_{A \rightarrow B}} \cdot P_A(0) \right) \right] \cdot \exp\left(-\int_0^t P_{B \rightarrow C} dt\right) \\
 & + \left[P_C(0) - \frac{P_{B \rightarrow C} \cdot P_{A \rightarrow B}}{(P_{C \rightarrow D} - P_{A \rightarrow B}) \cdot (P_{B \rightarrow C} - P_{A \rightarrow B})} \cdot P_A(0) - \frac{P_{B \rightarrow C}}{P_{C \rightarrow D} - P_{B \rightarrow C}} \right. \\
 & \quad \left. \cdot \left(P_B(0) - \frac{P_{A \rightarrow B}}{P_{B \rightarrow C} - P_{A \rightarrow B}} \cdot P_A(0) \right) \right] \cdot \exp\left(-\int_0^t P_{C \rightarrow D} dt\right) \tag{3.11}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_D(t) = & - \left[\frac{P_{B \rightarrow C} \cdot P_{C \rightarrow D}}{(P_{C \rightarrow D} - P_{A \rightarrow B}) \cdot (P_{B \rightarrow C} - P_{A \rightarrow B})} \cdot P_A(0) \right] \cdot \exp\left(-\int_0^t P_{A \rightarrow B} dt\right) \\
 & - \left[\frac{P_{C \rightarrow D}}{P_{C \rightarrow D} - P_{B \rightarrow C}} \cdot \left(P_B(0) - \frac{P_{A \rightarrow B}}{P_{B \rightarrow C} - P_{A \rightarrow B}} \cdot P_A(0) \right) \right] \cdot \exp\left(-\int_0^t P_{B \rightarrow C} dt\right) \\
 & - \left[P_C(0) - \frac{P_{B \rightarrow C} \cdot P_{A \rightarrow B}}{(P_{C \rightarrow D} - P_{A \rightarrow B}) \cdot (P_{B \rightarrow C} - P_{A \rightarrow B})} \cdot P_A(0) - \frac{P_{B \rightarrow C}}{P_{C \rightarrow D} - P_{B \rightarrow C}} \right. \\
 & \quad \left. \cdot \left(P_B(0) - \frac{P_{A \rightarrow B}}{P_{B \rightarrow C} - P_{A \rightarrow B}} \cdot P_A(0) \right) \right] \cdot \exp\left(-\int_0^t P_{C \rightarrow D} dt\right) + 1 \tag{3.12}
 \end{aligned}$$

STEP5 は、STEP4 で算出した各状態確率 P_i ($i=A, B, C, D$) に STEP1 で設定した各段階の基準健全度 W_i ($i=A, B, C, D$) をウェイトとして、トンネル単位を系とした健全度 H を算出する。健全度 H は、次式のとおりである。

$$H = \sum_i W_i \cdot P_i \tag{3.13}$$

第5節 健全度算出適用事例

5. 1 適用対象と適用データ

本モデルによる健全度算出では、実際に供用されている道路のトンネル 59 本におけるトンネル照明設備の2001年から2006年の間に実施された定期点検データに基づいている。定期点検は、対象トンネルを3区分にし、全区分を3年（1サイクル）で実施している。なお、材質区分でのトンネル数やデータサンプル数の内訳は、表-3.5のとおりである。

表-3.5 材質区分別トンネル数とデータ数一覧表

材質区分	トンネル数	総データ数
鋼板製	27	10,267
ステンレス鋼板製	32	13,334

5. 2 適用内容

基準健全度と遷移確率は、第4節4.2健全度算出手法に沿って記載する。

(1)点検結果における基準健全度の設定

定期点検結果の各段階（A・B・C・D）における基準健全度の設定は、対象トンネルの定期点検をしている熟練技術者10名に対してヒアリングを実施した。熟練技術者とは、点検や補修更新作業に精通し、経験的に設備の劣化進行を十分に認識している同レベルの指導的役割を担っている者である。

ヒアリングの具体は、熟練技術者に対して、定期点検の各点検評価結果を点検時の状態写真と比較することで、可視化による各員の認識のバイアスを排除し、同一認識化させた。そして、ヒアリング方式は、率直な意見が聞くことが可能とされるブレインストーミング方式を採用した。これは、点検作業における同一レベルにある者に対し、各点検評価結果の写真による同一認識から、劣化進行による補修時期の効果性等の意見交換をして、各点検評価結果と整合する健全度を0%～100%の間で設定するものである。なお、熟練技術者10名とした理由は、次の3点である。

第1点目は、各員の意見を確実に収集可能には10名が限界であるためである。

第2点目は、主体意見への同調者を排除することである。人員が少数の場合には、主対意見への恣意的同調意向が発生する傾向にある。このため、10名にすることでの主体意見分散は、各員の意見に近い自然的同調に変化させるものとなるためである。

第3点目は、分散された主体意見は、差異分析からの差異縮小による合意案導出でブラッシュアップされた意見形成が可能となるからである。

その結果、各段階ともヒアリング対象者間のバラツキ等はなく合意され、表-3.6 のとおりとなった。

各段階のスケール間隔は、A から B の間は 50%と健全度幅が広いが、B から C 及び C から D の間は 20%と健全度幅が狭くなっている。これは、損傷等が発生して進行状況を継続観察する B 段階を中間値とし、その後の機能低下の状況を細かい幅（20%）での段階区分（C・D）に設定している。

表-3.6 段階別基準健全度一覧表

段階区分	A	B	C	D
健全度 (%)	100	50	30	10

(2)遷移確率の算出

遷移確率は、点検結果の全データから、表-3.7 と表-3.8 のとおり鋼板製とステンレス鋼板製に区分して算出した。

a) 鋼板製

- ・初期状態 $i=A$ の場合

$P_{A \rightarrow A}=61.67\%$ 、 $P_{A \rightarrow B}=38.33\%$ であり、状態保持する確率が高い傾向にある。

- ・初期状態 $i=B$ の場合

$P_{B \rightarrow B}=4.66\%$ 、 $P_{B \rightarrow C}=95.34\%$ と隣接遷移する確率が高い傾向にある。鋼板製は、部分的に損傷や腐食等の劣化が発生すると急速に進行する傾向にある。状態が B 段階に遷移してから C 段階に遷移する時間は、非常に早いことを示している。

- ・初期状態 $i=C$ の場合

$P_{C \rightarrow C}=96.68\%$ 、 $P_{C \rightarrow D}=3.32\%$ と大部分が、状態保持する傾向にある。これは、状態が C 段階になった場合には、状態を進行させないために、補修を行っているため、補修後の急速な劣化進行による隣接遷移による場合を除いて大部分が状態保持となっている。

表-3.7 鋼板製遷移確率一覧表

パターン	初期状態	最終状態	遷移確率	
	i	j	$P_{i \rightarrow j}$	
1	A	A	$P_{A \rightarrow A}$	61.67%
2	A	B	$P_{A \rightarrow B}$	38.33%
3	B	B	$P_{B \rightarrow B}$	4.66%
4	B	C	$P_{B \rightarrow C}$	95.34%
5	C	C	$P_{C \rightarrow C}$	96.68%
6	C	D	$P_{C \rightarrow D}$	3.32%

b) ステンレス鋼板製

- 初期状態 $i=A$ の場合

$P_{A \rightarrow A}=87.83\%$, $P_{A \rightarrow B}=12.17\%$ であり、状態保持する確率が、鋼板製と比較して高い傾向にある。

- 初期状態 $i=B$ の場合

$P_{B \rightarrow B}=78.78\%$, $P_{B \rightarrow C}=21.22\%$ と状態保持する確率が高い傾向にある。ステンレス鋼板製は、鋼板製と異なり部分的な損傷や腐食等の劣化が発生しても急速には進行しないため、状態が B 段階に遷移してから C 段階に遷移する時間は、比較的緩やかである。

- 初期状態 $i=C$ の場合

$P_{C \rightarrow C}=97.67\%$, $P_{C \rightarrow D}=2.33\%$ と大部分が、状態保持する傾向にある。これは、ステンレス鋼板製も鋼板製と同様に状態が C 段階になった場合には、状態を進行させないために、補修を行っていることから、補修後の急速な劣化進行による隣接遷移による場合を除いて大部分が状態保持となっている。

表-3.8 ステンレス鋼板製遷移確率一覧表

パターン	初期状態 i	最終状態 j	遷移確率 $P_{i \rightarrow j}$	
1	A	A	$P_{A \rightarrow A}$	87.83%
2	A	B	$P_{A \rightarrow B}$	12.17%
3	B	B	$P_{B \rightarrow B}$	78.78%
4	B	C	$P_{B \rightarrow C}$	21.22%
5	C	C	$P_{C \rightarrow C}$	97.67%
6	C	D	$P_{C \rightarrow D}$	2.33%

鋼板製とステンレス鋼板製の遷移確率を比較すると、次の2点の特徴がある。

第1点目は、 B 段階から C 段階への遷移確率 $P_{B \rightarrow C}$ が、鋼板製はステンレス鋼板製より非常に高いことである。

第2点目は、 A 段階から B 段階への遷移確率 $P_{A \rightarrow B}$ が、鋼板製はステンレス鋼板製よりやや高いことである。

これは、鋼板製がステンレス鋼板製と比較すると、 A 段階から C 段階まで急速に健全度が低下する傾向にあることを示している。

5. 3 適用結果

本モデルでの健全度は、本節 5.2 適用内容の基準健全度と遷移確率から、鋼板製とステンレス鋼板製に区分して算出した。なお、健全度は、式(3.9)から式(3.12)により、状態確率 P_i ($i=A, B, C, D$) を算出し、表-3.6 の基準健全度 W_i ($i=A, B, C, D$) をウェイトとして、式(3.13)から算出している。

鋼板製とステンレス鋼板製の状態確率 P_i ($i=A, B, C, D$) から経過時間による変化状況の予測状態確率分布図は、図-3.6 と図-3.7 のとおりである。鋼板製のトンネルでは、経過年数が 5 年を過ぎた時点で C 段階の状態確率が 70%程度に到達すると予測される。また、経過年数が 10 年を超えると D 段階の状態確率は、20%程度になり、全体の 95%程度が C 段階と D 段階の状態になると予測される。

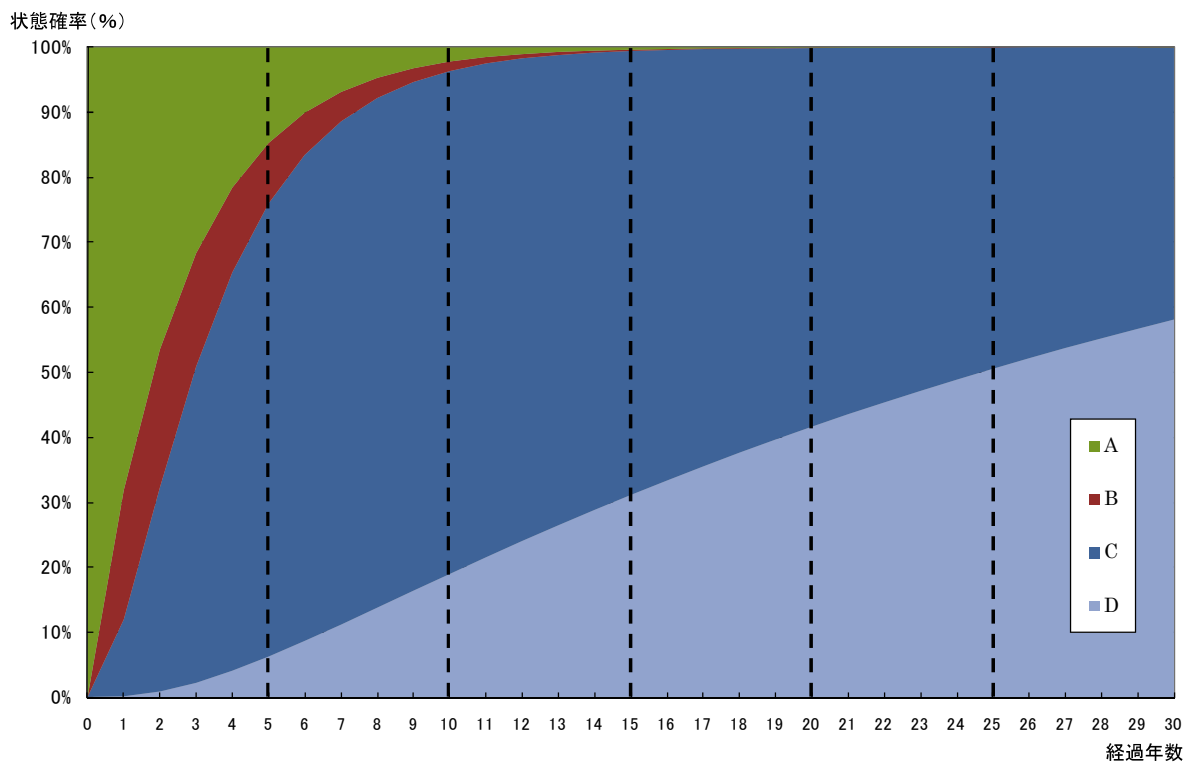


図-3.6 鋼板製予測状態確率分布図

ステンレス鋼板製のトンネルは、鋼板製と比較すると劣化等の進行が緩やかであり、経過年数が17年を過ぎた時点でC段階の状態確率が60%程度に到達すると予測される。また、経過年数が25年を超えると全体の90%程度がC段階とD段階の状態になると予測される。

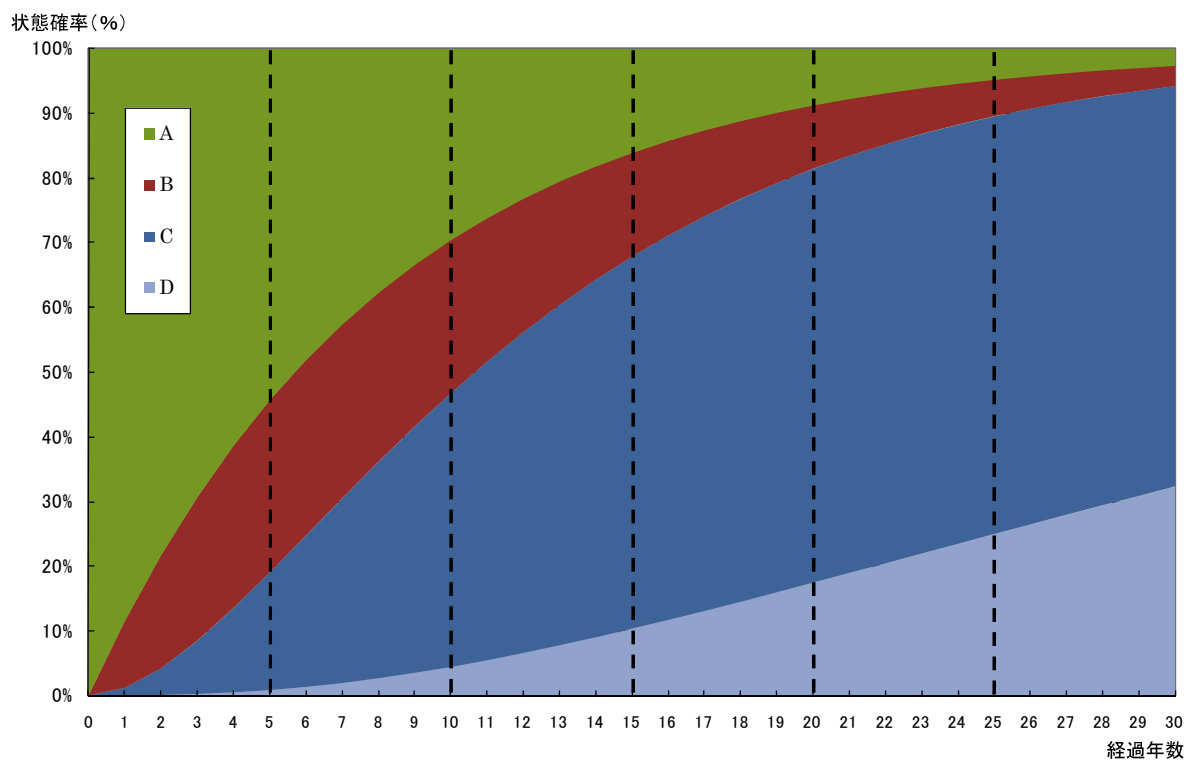


図-3.7 ステンレス鋼板製予測状態確率分布図

上記を踏まえた本モデルによるトンネル単位を系とした健全度算出結果は、**図-3.8**のとおりである。この結果から、鋼板製とステンレス鋼板製では、大きな違いが見られる。

鋼板製のトンネルでは、経過年数が8年を過ぎた時点で、また、ステンレス鋼板製のトンネルでは、24年を過ぎた時点でトンネルとしての健全度がC段階（30%程度）になると予測される。これは、状態 $i=B$ の場合における遷移確率の違いによるものである。状態がB段階に遷移してから、鋼板製は急速にC段階に遷移するが、ステンレス鋼板製はC段階に遷移する時間は、比較的緩やかであるため、経過年数として16年程度の違いになると考えられる。

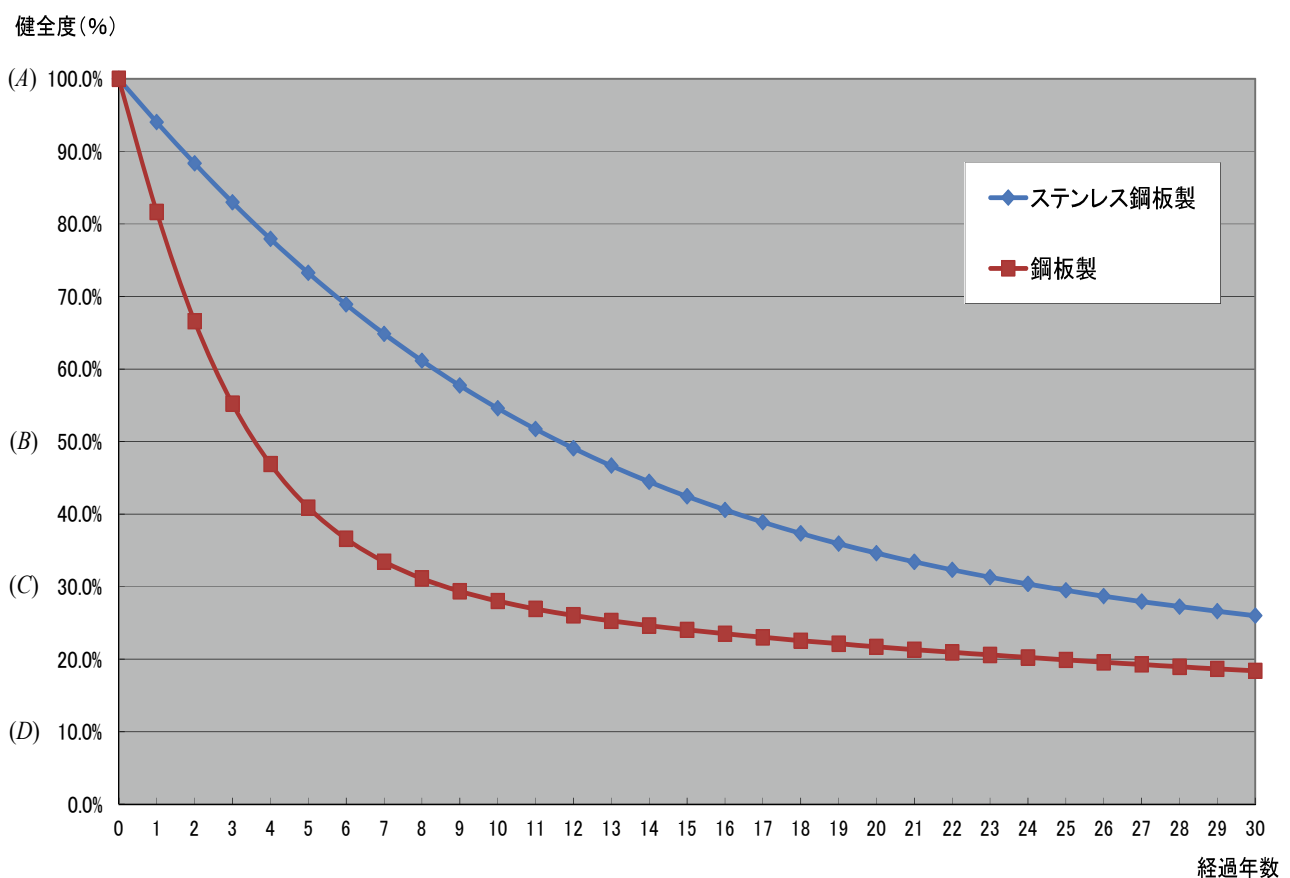


図-3.8 材質別予測健全度曲線図

5. 4 結論

本モデルで算出した健全度予測から、鋼板製とステンレス鋼板製に区分した健全度 30% 及び 20% に到達する予測経過年は、表-3.9 のとおりである。

本モデルでの健全度予測はトンネル単位であるため、健全度が著しく低下した場合には、トンネル単位で照明設備全更新となる。このため、トンネル単位での健全度が C 段階(30%) の場合には、部分的な補修等の修復作業により、状態維持が可能であると考えられる。

しかし、補修等を継続的に実施しても損傷等が進行することから、健全度は C 段階(30%) より向上することはない。そのため、継続的な補修等の修復作業は、経過時間とともに拡大化することが予想され、健全度が D 段階(10%) になるまでには、補修等の修復費用の増加やメンテナンス性の悪化等が考慮される。

この前提を踏まえて、図-3.8 の健全度予測の結果と表-3.9 の材質別予測経過年をみると、鋼板製は、健全度が 30% に到達する経過年数 8 年超から健全度が 20% に到達する 24 年超まで 16 年程の補修等の修復作業期間が発生すると予測される。また、ステンレス鋼板製は、健全度が 30% に到達する経過年数 24 年超から健全度が 20% に到達する 45 年超まで 21 年程の補修等の修復作業期間が発生すると予測される。このため、トンネル単位での照明設備全更新の最適なタイミングについては、鋼板製とステンレス鋼板製ともに補修等の修復作業期間が長いことから、健全度が 20% に到達する予測経過年を参考に健全度 30% に到達した経過年数以降の補修等の修復作業内容、修復作業費用、および修復作業による健全度経過推移を総合的に勘案した上で設定することが望ましいと考えられる。

今後は、高度情報化による質的・量的なデータの充実から、同種統計集団における標識や単位の進化が想定される。この標識や単位は、解析結果とあわせて、更新の材質・範囲・効果にも影響するものである。このため、標識や単位は、更新内容も考慮した選定をすることで、解析結果と整合した実効的な更新計画になることが期待できるものである。

表-3.9 材質別予測経過年一覧表

材質区分	予測経過年	備考
鋼板製	8.6	健全度30%となる時点
	24.7	健全度20%となる時点
ステンレス鋼板製	24.4	健全度30%となる時点
	45.4	健全度20%となる時点

第6節 効率的補修対応策へのモデル適用事例

6.1 適用目的

第5節では、本モデルを用いて、鋼板製とステンレス鋼板製に材質区分したトンネル単位での健全度予測を行った。その結果から、鋼板製は、点検結果の判定内容で補修等の必要がない経過観察の状態から補修等が必要となる状態への遷移確率が非常に高いことが明確になった。これは、この遷移確率が機能可能期間の短縮（短命化）に繋がっていると考えられる。これから、補修等の必要がない経過観察の状態でも、一般的な補修より簡易な補修（以下、「簡易補修」と呼ぶ）を予防保全として実施することで、この遷移確率を低下させて、延命化を図ることを目的とする。

6.2 適用概要

補修の実施には、人件費や材料費等の費用が伴うため、安易に補修を実施すると維持管理費用の増大を招くことになる。このため、健全度と費用とのバランスがとれた最適補修の手法検討が必要である。

補修を加味した健全度予測は、本モデルの遷移確率について、補修を加味した遷移確率にして、健全度を算出することで可能となる。この補修を加味した遷移確率は、補修の必要がない状態にある灯具数に対し、補修対象となる状態の灯具数を変化させ、その変化率（以下、「補修率」と呼ぶ）に対応させて算出する。この補修率に対応した遷移確率を用いて、本モデルから将来の健全度を算出した。

補修費用は、劣化や損傷の状態に対応可能な補修方法と補修対象数から補修費用を算出した。

これらから、健全度と補修費用の対比から健全性と経済性のバランスを意味する指標であるコスト有効度を用いて、健全性と経済性のバランス最適化を検討することで、最適な補修率を算出したものである。

6. 3 適用条件

本モデルの適用には、第4節4.2健全度算出手法を基本とし、第5節5.1適用対象と適用データにおける鋼板製トンネル照明設備を対象としたデータを活用する。

健全度算出は、次の条件を踏まえて算出する。

一般に、トンネル内全灯具数に対して補修等が必要な状態Cの灯具数割合が多くなった場合には、補修に加えて灯具更新について劣化状況や経年も含めた検討の必要性が発生する。この状況を踏まえると、補修等が必要でない状態Bで予防保全として簡易補修をする場合に、状態Bにある全灯具に実施することは少ないと考えられることから、検討対象から除くこととする。ここで、補修数を変化させるパラメータとして、全灯具数に対する補修数の比率を補修率 r と定義する。なお、補修率 r を導入する前提条件として、補修する灯具は、ランダムとし、特に点検結果以外の状態内容に基づいた優先性はないものとする。

補修費用は、次の条件を踏まえて算出する。

一般に、補修の実施内容は、各部位の判定に基づき、方法（全更新・部分更新・補修）、範囲（全域・部分域）、タイミング（緊急対応・日常点検対応・詳細点検対応）の要素で構成される。そして、点検結果からの状態と費用を考慮して実施する。本節の目的は、予防保全の有効化と実用化であるため、通常の状態C、Dでの事後的補修に状態Bでの予防的補修の実施を追加することを前提条件とする。

また、状態Bでの補修実施内容は、次のとおりとする。補修の方法は、簡易補修（腐食除去・腐食抑制剤塗布）、範囲は部分域（本体部の一部）、タイミングは点検時対応（補修費用以外の費用を伴わない）とする。

これより、各状態の補修費用（万円）は、 $(B=3, C=5, D=5)$ と設定した。状態Bの予防的補修は、簡易補修であるため、状態C、Dの事後的補修より補修費用が低いものである。

6. 4 補修率を加味した健全度予測

補修を加味した遷移確率は、第4節4.2健全度算出手法における遷移確率算出の式(3.1)、及び式(3.2)が補修率 r の関数となる。具体には、補修率 r を加味したときの状態 i から状態 j への遷移確率 $P_{i \rightarrow j}(r)$ と状態 i での保持確率 $P_{i \rightarrow i}(r)$ は、 $0 \leq r < 1$ の条件で、式(3.14)、及び式(3.15)のとおりとなる。

$$P_{i \rightarrow j}(r) = \left| \frac{A_i - B_i}{B_i} \right| (1 - r) = (1 - r)P_{i \rightarrow j} \quad (3.14)$$

$$P_{i \rightarrow i}(r) = 1 - P_{i \rightarrow j}(r) = P_{i \rightarrow i} + rP_{i \rightarrow j} \quad (3.15)$$

上式から表-3.7の遷移確率 $P_{B \rightarrow C}$ と保持確率 $P_{B \rightarrow B}$ を用いて、点検や補修の実務者における実効性を考慮した補修率 r が下位値 0%（補修をしない場合）、中間値 50%、上位値 90% の場合を算出すると、表-3.10のとおりとなる。

表-3.10 補修率を加味した遷移確率

補修率 r	遷移確率 $P_{B \rightarrow C}$	保持確率 $P_{B \rightarrow B}$
0%	95.34%	4.66%
50%	47.67%	52.33%
90%	9.53%	90.47%

次に、この補修率を加味した遷移確率から簡易動的マクロモデルを用いて、15 サイクル (45 年経過) までのトンネル単位の健全度予測する。上記の算出方法により、補修率 r が 0%、50%、90%における健全度予測の結果は、**図-3.9** のとおりである。補修率 r が 0%、50%の場合と比較して、90%における健全度は、1 サイクルから 9 サイクルまで 5%以上高く、その中でも 2 サイクルから 4 サイクルまでは 10%程度高い結果となっている。これより、補修率 r が 0%、50%、90%において、健全性の指標であるトンネル単位の健全度で比較した場合は、補修率 90%における健全性が最高となっている。

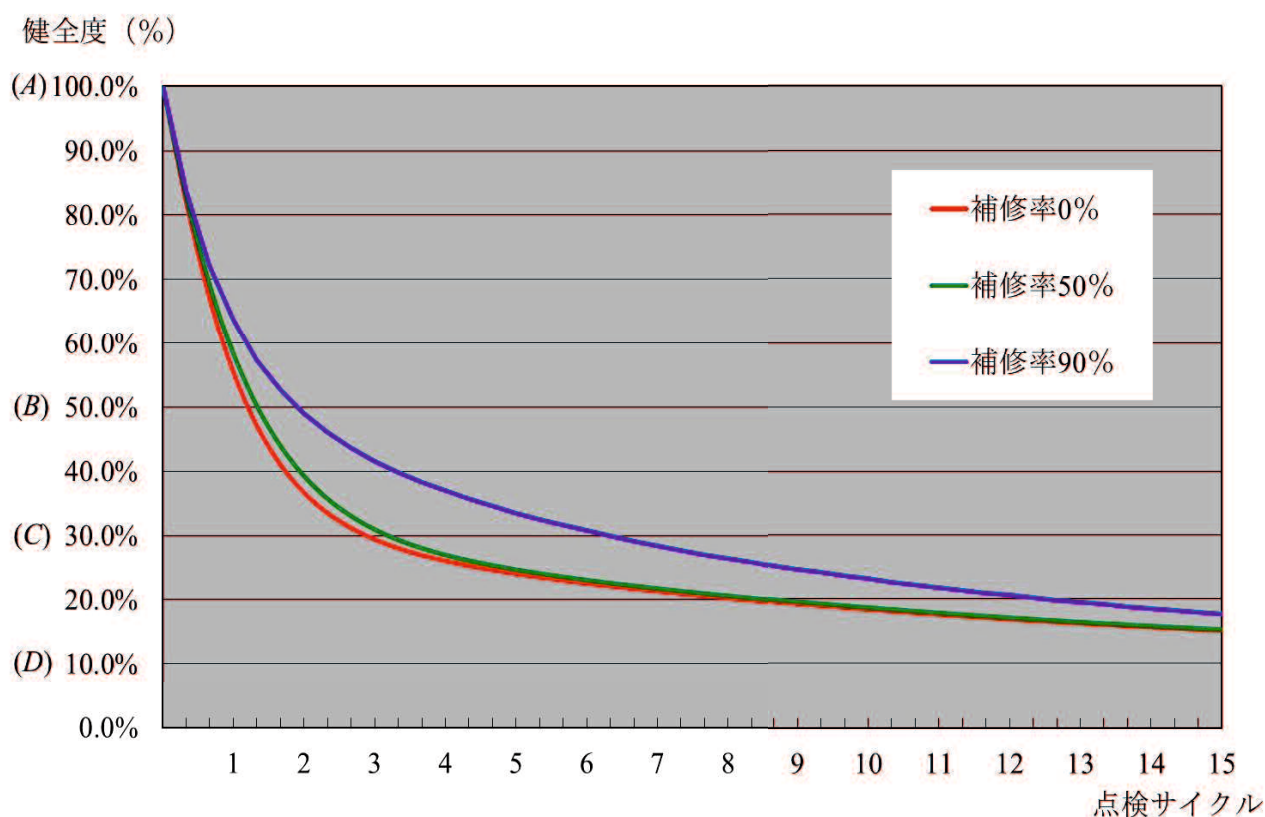


図-3.9 補修率別予測健全度

6. 5 最適補修率の算出

最適補修率の算出には、補修における健全度と費用とのバランスをみる指標として、健全度と費用の比を用いたコスト有効度を導入する。一般に、コスト有効度は、設備機械における保全性の設計で機能状態を表す故障を考慮した稼働率とその故障修理の総費用の割合（稼働率／修理総費用）で表現され、設備のLCCを最小化する指標として用いられている⁵³⁾。このコスト有効度を適用する目的は、分子の機能を高くし、分母の費用を低くすることであるため、コスト有効度が高値である程、機能と費用のバランスがとれていることを示している。このように、コスト有効度は、LCC最小化指標であることから、分子は、計測時の機能状態であるが、分母は、設備設置から計測時までの総費用となっている。これらの内容を踏まえて、コスト有効度を社会基盤施設に適用すると、機能状態の故障を考慮した稼働率に該当するものが劣化を考慮した健全度となり、故障修理の総費用に該当するものが補修の総費用となる。上記より、この割合（健全度／補修総費用）をコスト有効度と定義して、補修率 r における計測時 t サイクルでの健全度を $H(t, r)$ 、設置から計測時 t サイクルまで（1から t サイクルまで）に要した補修総費用を $C(t, r)$ としたとき、コスト有効度 $CE(t, r)$ は、次式で示される。

$$CE(t, r) = \frac{H(t, r)}{C(t, r)} \quad (3.16)$$

式(3.16)より、1から15サイクルにおける各サイクルまでのコスト有効度（補修率 r ：0%、50%、90%）の結果は、表-3.11のとおりである。また、1から15サイクルにおける各サイクルまでの補修率0%（補修をしない場合）の補修総費用を基準に補修率50%と90%の場合との対比は、表-3.12のとおりである。

これより、コスト有効度を用いて、補修率 r が0%、50%、90%における最適な補修率を算出する。一般に、数値統計では、このような複数の数値を1つの数値に集約し、代替する方法として、一般化平均概念がある⁵⁴⁾。いま、 n 個の数値を x_1, x_2, \dots, x_n とし、平均値を x_α としたとき、一般化平均概念は、次式のとおり定義される。なお、 α は平均演算を区分するパラメータである。

$$x_\alpha = \left(\frac{1}{n} \sum_{l=1}^n x_l^\alpha \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (3.17)$$

表-3.11 コスト有効度

サイクル	補修率0%	補修率50%	補修率90%
1	1.16116	0.98668	1.28358
2	0.22881	0.22763	0.35200
3	0.09865	0.10020	0.16747
4	0.05866	0.05943	0.10011
5	0.04057	0.04100	0.06736
6	0.03040	0.03069	0.04869
7	0.02390	0.02413	0.03692
8	0.01942	0.01961	0.02899
9	0.01616	0.01632	0.02339
10	0.01369	0.01383	0.01928
11	0.01179	0.01190	0.01618
12	0.01027	0.01037	0.01378
13	0.00905	0.00913	0.01189
14	0.00805	0.00811	0.01037
15	0.00721	0.00727	0.00914

表-3.12 補修費対比（補修率0%基準）

サイクル	補修率0%	補修率50%	補修率90%
1	1.000	1.241	1.043
2	1.000	1.077	0.869
3	1.000	1.037	0.834
4	1.000	1.023	0.832
5	1.000	1.017	0.840
6	1.000	1.013	0.851
7	1.000	1.011	0.863
8	1.000	1.009	0.874
9	1.000	1.008	0.884
10	1.000	1.007	0.893
11	1.000	1.006	0.902
12	1.000	1.006	0.909
13	1.000	1.005	0.915
14	1.000	1.005	0.921
15	1.000	1.005	0.926

この一般化平均概念は、 $\alpha \rightarrow +\infty$ で最大値決定、 $\alpha \rightarrow -\infty$ で最小値決定となって代替性がない。また、 $1 < \alpha < +\infty$ では比較的大きい数値重視、 $-1 > \alpha > -\infty$ では比較的小さい数値重視の不完全代替性となる⁵⁴⁾。これより、 $-1 \leq \alpha \leq 1$ での代表的な算術平均 ($\alpha=1$)、幾何平均 ($\alpha=0$)、調和平均 ($\alpha=-1$) における1から t サイクルまでのコスト有効度 (補修率 r : 0%, 50%, 90%) について検討する。この検討の方法と目的は、次のとおりである。まず、1から15サイクル間で各サイクルまでの全サイクル平均を上記演算手法で算出することにより、経年的なLCC最小化における安定性を確認し、最適な補修率の選定に資する。次に、補修率0%と最適補修率との対比により、1から15サイクル間で最大効果を発揮するサイクル時を確認することで、簡易補修での効果期間とその後の補修の方法や実施期間の見直しに資するものである。

(1)算術平均の場合

算術平均は、式(3.17)における $\alpha=1$ の場合で、式(3.18)のとおりとなる。

$$x_1 = \frac{1}{n} \sum_{l=1}^n x_l \tag{3.18}$$

式(3.18)による1から15サイクルにおける各サイクルまでのコスト有効度 (補修率 r : 0%, 50%, 90%) の平均値の結果を表-3.13に示す。

表-3.13 コスト有効度の算術平均

サイクル	補修率0%	補修率50%	補修率90%
1	1.16116	0.98668	1.28358
2	0.69498	0.60715	0.81779
3	0.49621	0.43817	0.60102
4	0.38682	0.34348	0.47579
5	0.31757	0.28299	0.39410
6	0.26971	0.24094	0.33653
7	0.23459	0.20997	0.29373
8	0.20770	0.18617	0.26064
9	0.18641	0.16730	0.23428
10	0.16914	0.15195	0.21278
11	0.15484	0.13922	0.19491
12	0.14279	0.12848	0.17981
13	0.13250	0.11930	0.16689
14	0.12361	0.11136	0.15571
15	0.11585	0.10442	0.14594

これより、コスト有効度が各サイクルで高値である補修率 90%の場合に健全性と経済性のバランスが最もよいことが示されている。次に、表-3.13 における補修率 0%と補修率 90%との対比を 15 サイクルまでの各サイクルで見ると、図-3.10 のとおり 15 サイクルで最大となる。

更に 15 サイクル以降においても補修率 0%や 50%の場合では、状態 C や状態 D になる灯具数が多くなることから、健全度の低下と補修費用の増加が予測されるため、15 サイクルまでと同様の傾向が継続されることとなる。これより、15 サイクル以降でも健全性と経済性で最大効果を発揮する可能性が想定される。

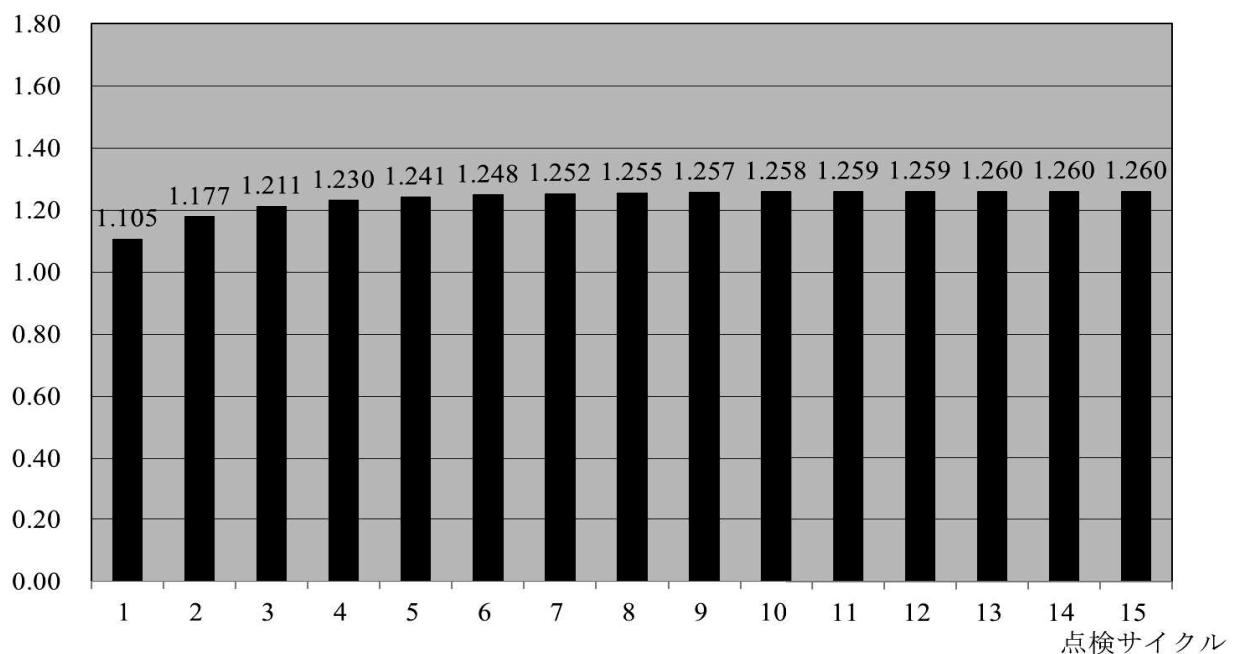


図-3.10 算術平均対比

(2)幾何平均の場合

幾何平均は、式(3.17)における $\alpha=0$ の場合で、式(3.19)のとおりとなる。

$$x_0 = \left(\prod_{l=1}^n x_l \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3.19)$$

式(3.19)による1から15サイクルまでのコスト有効度（補修率 r : 0%, 50%, 90%）の平均値の結果を表-3.14に示す。これより、コスト有効度から補修率90%の場合に健全性と経済性のバランスが最もよいことが示されている。

表-3.14 コスト有効度の幾何平均

サイクル	補修率0%	補修率50%	補修率90%
1	1.16116	0.98668	1.28358
2	0.51544	0.47391	0.67217
3	0.29705	0.28233	0.42296
4	0.19802	0.19124	0.29501
5	0.14421	0.14054	0.21956
6	0.11125	0.10906	0.17082
7	0.08931	0.08792	0.13724
8	0.07380	0.07289	0.11300
9	0.06234	0.06172	0.09486
10	0.05357	0.05315	0.08089
11	0.04668	0.04639	0.06988
12	0.04115	0.04094	0.06104
13	0.03662	0.03648	0.05382
14	0.03287	0.03276	0.04785
15	0.02971	0.02964	0.04285

次に、表-3.14 における補修率 0%と補修率 90%との対比を 15 サイクルまでの各サイクルでみると、図-3.11 のとおり 7 サイクルで最大となる。更に 15 サイクル以降においても補修率 0%や 50%の場合では、状態 C や状態 D になる灯具数が多くなる傾向であることから、健全度の低下と補修費用の増加が予測されるため、15 サイクルまでと同様の傾向が継続されることとなる。これより、補修率 90%における 7 サイクルまでの間で健全性と経済性で最大効果を発揮するものとなっている。

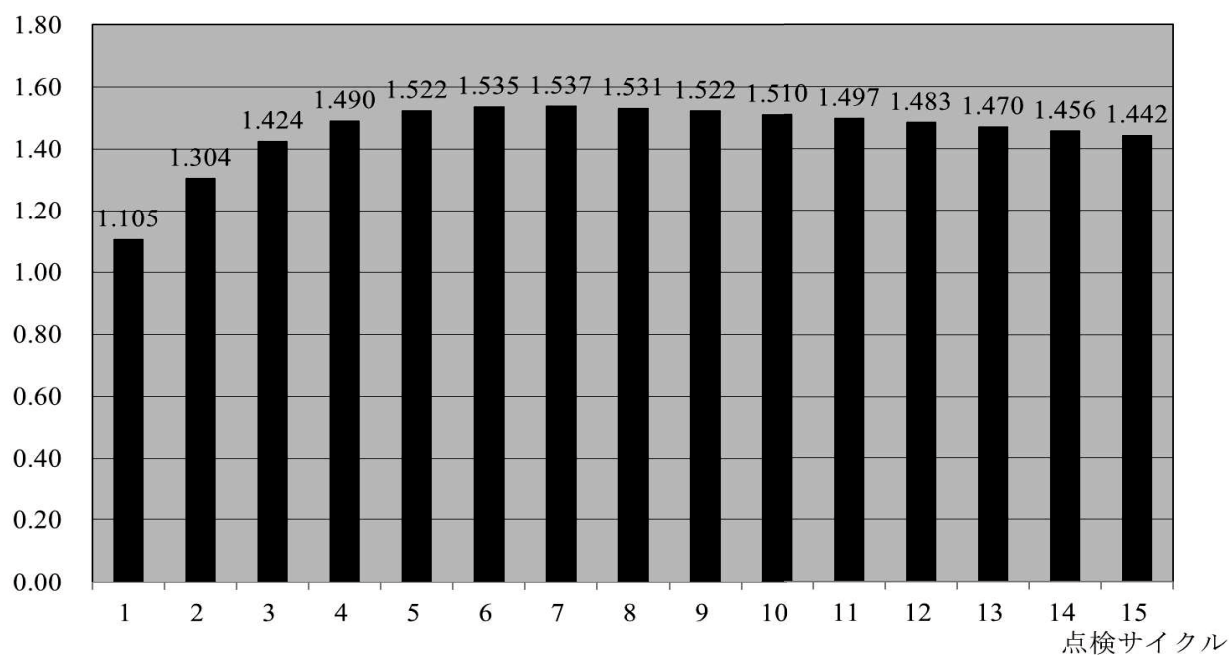


図-3.11 幾何平均対比

(3)調和平均の場合

調和平均は、式(3.17)における $\alpha=-1$ の場合で、式(3.20)のとおりとなる。

$$x_{-1} = \left(\frac{1}{n} \sum_{l=1}^n x_l^{-1} \right)^{-1} \quad (3.20)$$

式(3.20)による1から15サイクルまでのコスト有効度（補修率 r : 0%, 50%, 90%）の平均値の結果を表-3.15に示す。これより、コスト有効度から補修率90%の場合に健全性と経済性のバランスが最もよいことが示されている。

表-3.15 コスト有効度の調和平均

サイクル	補修率0%	補修率50%	補修率90%
1	1.16116	0.98668	1.28358
2	0.38228	0.36991	0.55249
3	0.19521	0.19497	0.31279
4	0.12340	0.12418	0.20428
5	0.08762	0.08833	0.14524
6	0.06669	0.06727	0.10916
7	0.05311	0.05359	0.08531
8	0.04364	0.04405	0.06864
9	0.03670	0.03705	0.05650
10	0.03142	0.03173	0.04736
11	0.02729	0.02755	0.04030
12	0.02398	0.02421	0.03473
13	0.02128	0.02148	0.03026
14	0.01904	0.01922	0.02661
15	0.01717	0.01732	0.02361

次に、表-3.15における補修率0%と補修率90%との対比を15サイクルまでの各サイクルでみると、図-3.12のとおり5サイクルで最大となる。更に15サイクル以降においても補修率0%や50%の場合では、状態Cや状態Dになる灯具数が多くなる傾向であることから、健全度の低下と補修費用の増加が予測されるため、15サイクルまでと同様の傾向が継続されることとなる。これより、補修率90%における5サイクルまでの間で健全性と経済性で最大効果を発揮するものとなっている。

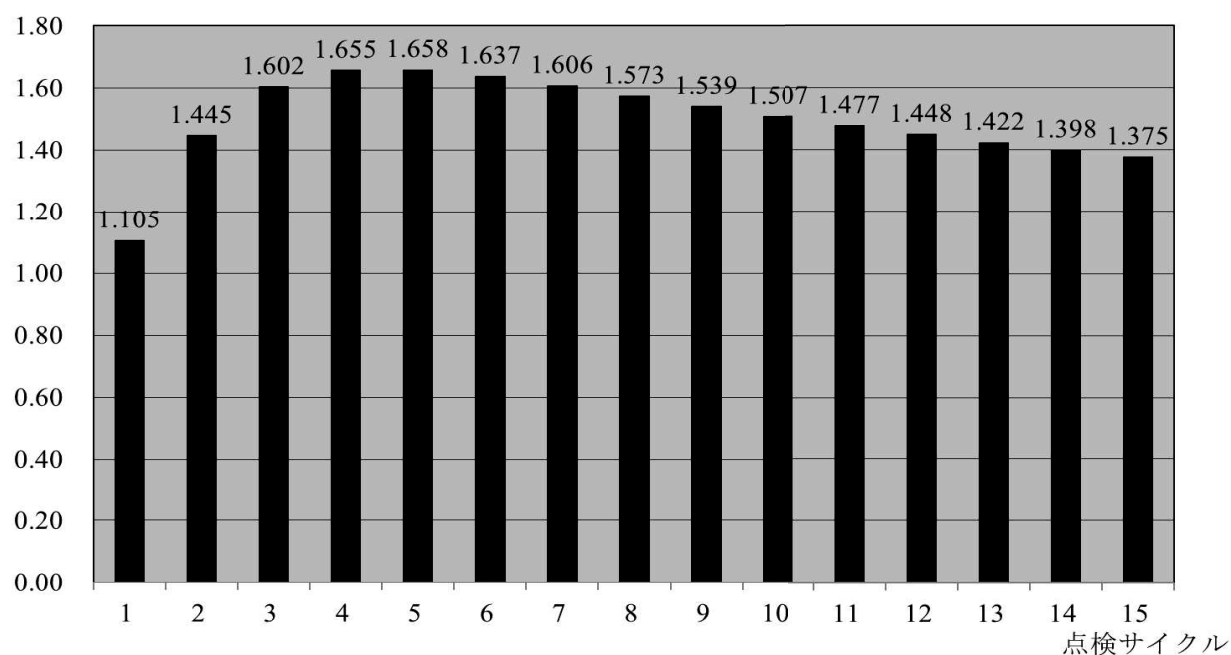


図-3.12 調和平均対比

6. 6 結論

(1)~(3)の結果より、算術平均、幾何平均、調和平均のすべての場合において、補修率 90% のときに健全性と経済性のバランスが最もよいことが示された。これより、1 から 15 サイクルまでのコスト有効度とその後の推移傾向も踏まえて、補修率 90% が最適補修率であると考えられる。次に、補修率 90% における算術平均、幾何平均、調和平均での最大効果を発揮するサイクル期間が異なることから、各平均演算の特性を踏まえて最適な平均演算を検討する。

一般に、実数に活用できる標準的な算術平均に対し、正の実数における 2 種の数量比の平均値では、対数変換が容易な幾何平均が有益である⁵⁵⁾。また、2 種の数量比において、分子の数量を基準とする場合には、調和平均が有益である⁵⁶⁾。これらの各平均演算の特性を踏まえて、コスト有効度における最適な平均演算を検討する。コスト有効度は、式(3.16)で示されるように、補修率 r における t サイクルでの健全度 $H(t, r)$ と t サイクルまでに要した補修総費用 $C(t, r)$ の 2 種の関数の比率から成立している。このような数量比には、標準的な算術平均ではデータ特性が明確化しないため、幾何平均と調和平均について再検討する。このコスト有効度における 2 種の関数で基準となるものは、分母の t サイクルまでに要した補修総費用 $C(t, r)$ であることから、調和平均の有益性には当てはまらなないと考えられる。これより、一般化平均概念の算術平均、幾何平均、調和平均における最適平均演算は、幾何平均であると考えられる。また、図-3.10、図-3.11、図-3.12 において最大となるサイクル（算術平均：15 サイクル、幾何平均：7 サイクル、調和平均：5 サイクル）からも簡易補修効果の最適期間に対する現実性が示されている。上記より、一般化平均概念を用いた最適平均演算を幾何平均として、最適補修率 90% におけるサイクルの視点で、健全性と経済性の双方からの有効性について検討する。

最適補修率 90% における幾何平均での 1 から 15 サイクルまでのコスト有効度の補修率 0% 対比結果は、図-3.11 のとおり 6 から 8 サイクルで補修率 0% 対比 1.53 以上となり、7 サイクルにおいて最大値の 1.537 となる。この 6 から 8 サイクルにおける最適補修率 90% のトンネル単位の健全度は、図-3.9 より 30% から 25% 程度であり、状態 C の初期に該当している。一方、補修率 0% のトンネル単位の健全度は、図-3.9 より 25% から 20% 程度であり、状態 C の中期に該当している。これより、最適補修率 90% においては、トンネル単位の健全度 30% から 25% 程度である状態 C の初期時点で健全性および経済性の双方の観点から有効性が最大になると考えられる。更に、この最適補修率 90% と補修率 0% とを延命性の観点で比較すると、健全度 30% 時点で 10 年程度、健全度 20% 時点で 13 年程度の延命予測と

なっている。

本節では、本モデルを用いて、鋼板製のトンネル照明設備で遷移確率の高い状態 B における継続的な簡易補修による有効性として、健全性と経済性の双方から最適補修率と最大効果を発揮する点検サイクルでの経年時を提案した。次に、最適補修率における延命予測を算出することで、状態 B における継続的な簡易補修による有効性を明確化した。その際、点検や補修の実務者における実効性の観点から、補修率を連続値でなく、サンプル離散値として取り扱ったが、データの僅少性や実務者の簡易性の発展により、今後は、連続値解析にも応用展開が対応可能である。また、本手法は、アセットマネジメントの実務者が、補修を加味した健全度や延命の予測から費用制約を踏まえた最適な補修方法について、簡易的に検討することが可能であることを示している。これは、予算制約が厳しい地域での適用により、最大効果が期待できるものである。

しかし、補修率に応じた補修対象をランダムに決定することは、実務者負担となることが予想される。このため、実務者負担の軽減と簡易補修の有効性を最大化するためにも補修の優先基準として、状態 B を状態 B_1 (軽度的簡易補修の実施が必要な状態)・ B_2 (通常簡易補修の実施が必要な状態) に区分化する検討も必要である。

更に、本手法では、各状態での補修費用を設定値としたが、これらを実態に見合った変数とし、補修率との双方の変数による最適な補修費用と補修率の検討も今後の重要課題である。これらの課題の克服によって、本モデルの補修対応策への適用展開が可能となり、早期の予防保全対応とあわせることで、アセットマネジメントの実用性推進が期待できるものである。

第7節 リスクマネジメントに対するモデル適用事例

7. 1 適用目的とリスク定義

社会基盤施設のアセットマネジメントは、経年的な劣化・損傷等の維持管理における補修・更新の効率性追求が実用的となっている。一方で、地震等のイベント・リスク（以下、「イベント・リスク」という）管理に対しては、損傷被害が大きく、修復が経年劣化による補修や部分更新の範囲を超える場合が大部分であるため、全更新を考慮したものとなる。このため、両者を考慮したマネジメントはあまり検討されていないのが実態である。しかし、1995年1月17日の阪神淡路大震災を契機にその後のマグニチュード6クラスの地震は、年々増加する傾向にある。また、2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震（以下、「東日本大震災」という）以降、毎年、日本の各所で同等クラスの地震が発生している状況にある。これらの状況から、今後の首都直下をはじめ東海・東南海・南海トラフの地震を考慮した場合、社会基盤施設のアセットマネジメントにおいて、イベント・リスクを考慮することは避けて通れない状況になってきている。

一般に、イベント・リスクには、地震をはじめ台風等の降水風雨害、大規模自然火災等の自然災害から爆発、大規模人的火災、テロ的破壊行為等の人的災害まで多種多様である。本論文では、地震の災害リスクを対象として、本モデルの適用性を検討する。なお、地震被害は、地震規模が大きくなるとその被害内容も拡大する。地震の被害対象を道路トンネルとした場合には、直接リスクとしてトンネル本体で覆工部の亀裂・剥離による落下やインバート部の隆起、付帯施設で照明設備・標識設備の落下や断線による機能停止が想定される。更に、電力や通信の公共インフラの機能停止による道路トンネルへの間接リスクも想定できる。しかし、直接リスクと間接リスクには、機能回復（レジリエンス）における事業継続マネジメント（BCM: Business Continuity Management）に大きな相違がある。直接リスクは、減災（ミチゲーション）と対応（レスポンス）の双方の観点で、アセットマネジメントとの融合により、リスクコントロールが可能なことである。このため、本論文での地震の定義は、トンネル照明設備の落下等の直接リスクとする。これは、自然劣化に災害リスクを加味した状態変化を本モデルによって検討することで、減災と対応の双方の観点での効果を目的としている。減災の観点では、自然劣化に対する補修等の対処の必要性の再認識と災害発生に対応した効率的な更新計画策定と計画対応準備である。対応の観点では、減災で事前計画した内容の迅速な初動と状況変化に対応した修正実行である。この

ように、アセットマネジメントは、リスクマネジメントの事業継続マネジメントを融合させることで、イベント・リスクに対するマネジメントの強化を可能とするものである。

これらより、本節では、本モデルの適用事例として、自然劣化に地震リスクを加味した被害後の健全度予測を行う。そして、算出された被害後の健全度予測を用いて、早期復旧時の想定復旧額と想定回復健全度によるコストマネジメントを行うものである。

7. 2 地震リスク関連の既往研究

地震リスク関連の研究では、国内で藤井らや高橋らが、過去の橋梁被災時データからフラジリティカーブやハザードカーブを用いて損傷発生確率を算出している。そして、損傷度を多段階に分類し、段階に応じた修復額から BMS で LCC を算出して予防保全型維持管理の効果を提案している^{57),58)}。常井は、下水道管路施設を対象に橋梁と同様の方法でシールドトンネルにおける LCC を算出している⁵⁹⁾。南らは、定期点検データとその位置情報を基本に GIS 上に表示して 50 年に 2% の確率で震度をマッチングした震度メッシュを作成し、緊急輸送等の道路機能の重要性から修復の優先度を決定している⁶⁰⁾。震度メッシュデータを活用したものでは、他谷らが構造物毎における被害状況を震度別被害率関数として算出し、橋梁とトンネルの被害率がほぼ同等であることを示している⁶¹⁾。

海外では、理論的なものとして、Tesfamariam and Goda が、リスク分析の不確実性を概念的に偶然性と認識性に分類し、その対応方法の一般情報理論からモンテカルロシミュレーションを実行して累積確率分布を計算することでリスク評価をしている⁶²⁾。更に、意思決定ツールとしての費用便益分析 (CBA: Cost Benefit Analysis) や LCC を用いて、地震リスク軽減措置の代替選択の最適化手法を検討している⁶²⁾。

具体的なものとしては、Mayet and Madanat が、地震と構造物の脆弱性関係について、ハザードカーブやフラジリティカーブからのリスク分析を BMS に取入れ、地震発生を考慮した橋梁の維持管理や補修および再建の意思決定モデルとして活用可能としている⁶³⁾。

BMS 関連では、地震の被害直後の状態と復旧後の状態からの段階モデルを GA に適用させて、最適なコストマネジメントをしたものがある⁶⁴⁾。また、地震被害後の改修における優先指標を経済指標に変換したリスクモデルを開発し、カリフォルニアの橋梁を対象に改修の優先順位と費用推定をしているものがある⁶⁵⁾。

意志決定支援関連では、地震の危険性、建築物の損傷度、修理費と崩壊率の要素から、一次二次モーメント近似による数値積分をモンテカルロシミュレーションで計算し、年間

損失・崩壊率の期待値を算出しているものがある⁶⁶⁾。また、地震被害を社会の許容リスクや生活基準を踏まえた効用関数を用いて、LCCから建築物の最適なリスク耐震設計のフレームワークを考案しているものがある⁶⁷⁾。

このように、地震の発生確率を踏まえたリスク評価とコストマネジメントを踏まえた意志決定支援から構成されるものが多く、経年劣化のアセットマネジメントにイベント・リスクを加味した健全度予測やその予測からの維持管理研究の事例は、少ないのが現状である。

7. 3 適用条件

本モデルにイベント・リスクを適用するには、発生頻度（発生確率）や発生影響（影響被害度）の観点からの課題があった。まず、発生頻度では、経年劣化は連続性であり、イベント・リスクは断続性であるため、経年劣化の連続時間軸上でイベント・リスクを取り扱うことに無理があった。また、発生影響では、経年劣化よりイベント・リスクによる被害が大きいため、経年劣化を考慮せず、イベント・リスクのみを取り扱ってきた。これは、地震被害における安藤らの下水道管路施設による検討事例⁶⁸⁾で、被害が大きい場合、イベント・リスクによる健全度低下のみを考慮していることから示されている。

このような理由から、地震の発生時を特定せず、経過年毎の発生を想定することで、経年劣化モデルに地震リスクを同一の連続時間軸上で取り扱い、健全度予測や復旧マネジメントをする。なお、本検討では、構造物に影響する地震の過去データが僅少であることから、予測される地震発生後の健全度の算出結果より算出手法とその復旧マネジメント手法に重点を置くものとし、設定条件とその設定理由を以下の①～⑥のとおりとした。

① 健全度の単位は、トンネルチューブとした。

地震の被害は、経年劣化と比較して機能低下が大きいと想定されるため、個々の照明灯具における健全度を捉えても意味をなさないので、本モデルを適用する。

② 被害の想定対象物は、同様の構造を有する橋梁添架管路を適用した。

構造物における地震被害データは、橋梁部におけるものが多く、トンネル部に関するものはあまり存在しない。また、照明灯具のような小規模施設に関する詳細データも存在しないため、照明灯具設置部の基本構造が類似した橋梁添加管路を適用対象とした。

③ 被害率は、過去の地震被害データから算出した想定被害率を適用した。

橋梁やトンネル等の構造種別による被害率は、他谷らが過去の中越地震等を参考に作成

したものがあるため⁶¹⁾、これらの被害関数を適用した。次に、東日本大震災の鉄道の被害率⁶⁹⁾から各震度における鉄道の構造種別の被害率を算出した。更に、山崎らが東日本大震災における電気通信土木設備の橋梁部のものと比較検証した⁷⁰⁾。これより、上記に算出したトンネルの被害率を照明灯具の被害率とした。

- ④ 被害率は、地震発生時を特定せず、経過年毎で地震発生した場合の劣化を考慮した。本目的は、地震発生時期の予測でなく、発生後の予測健全度や復旧マネジメントとするため、発生時期を特定しないこととした。これより、照明灯具設置後の経過年毎に地震が発生した場合を想定し、①の劣化による健全度に、③の被害率を加味することで劣化と地震リスクとを同一の時間軸上で取り扱うこととした。
- ⑤ 復旧方法は、地震被害は更新とし、それ以外は経年劣化による復旧方法とした。地震被害は甚大であるため、被害率から算出された照明灯具数は、補修不能として全更新とした。残りの照明灯具数は、経年劣化の範囲とし、劣化状態にあわせた復旧方法（更新・補修・経過観察）とした。
- ⑥ 照明灯具全更新時期の検討に際しては、コスト有効度を適用した。復旧マネジメントとして、経過年毎に照明灯具の全更新判断を検討した。検討に際しては、回復した健全度（以下、「回復健全度」という）と、⑤の復旧方法から算出した復旧額との割合（回復健全度／復旧額）を復旧のコスト有効度（以下、「復旧コスト有効度」という）とした。これを照明灯具の全更新時期検討における指標とした。

7. 4 予測手法とマネジメント内容

7.3 適用条件から経年劣化に地震リスクを結合した灯具の健全度予測手法とその手法を活用したマネジメントのフローを図-3.13 のとおり示し、各段階の内容を解説する。

(1) 想定被害率の算出

他谷ら⁶¹⁾の被害関数は、震度別被害率 P (件/km)、震度 I とした場合、式(3.21)のとおりである。なお、 α , β は、パラメータである。

$$\log_{10} P = \alpha I + \beta \quad (3.21)$$

ここで、表-3.16 の構造物区分が分類なしに該当する α , β から式(3.21)により算出される震度別被害率 P と東日本大震災の鉄道施設における震度別被害率⁶⁹⁾とを比較する。

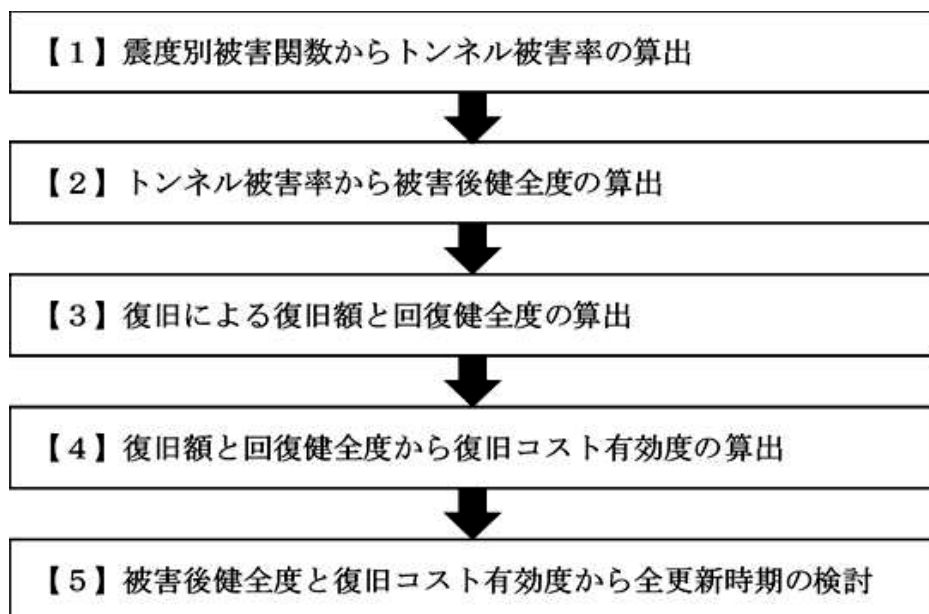


図-3.13 予測手法・マネジメントフロー図

表-3.16 各構造物の被害関数係数

構造物区分	α	β
分類なし	1.41	-8.51
橋梁	1.47	-9.77
トンネル	1.08	-7.43

東日本大震災の鉄道施設における震度別被害率(件/km) P' とすると、表-3.17のとおりである。このとき、異なった地震による震度別被害率である P と P' の関係は、一般的に非線形性であると考慮されるため、パラメータ a 、 b から成る対数モデル式と仮定すると、式(3.22)のとおりとなる。

$$P' = a \log_{10} P + b \quad (3.22)$$

いま、式(3.23)とした場合、式(3.22)は線形モデルに変換された式(3.24)となる。

$$X = \log_{10} P \quad (3.23)$$

$$P' = aX + b \quad (3.24)$$

ここで、表-3.17から式(3.24)の未定係数 a 、 b について、最小二乗法を用いて算出すると、表-3.18のとおりである。 R^2 は、回帰分析の精度を表す決定係数である。

この結果より、 P と P' の関係を表す線形モデル式(3.24)における単回帰分析の精度が非常に高いことから、 P と P' の関係式として式(3.24)を適用する。本来は、構造物区分で a 、 b を算出するべきであるが、構造物区分データがないため、構造物に均等な被害が発生したと仮定し、表-3.18の a 、 b を定数とする。

表-3.17 震度別被害率

震度	I	P	P'
5弱	4.75	0.02	0.26
5強	5.25	0.08	1.01
6弱	5.75	0.40	2.03
6強	6.25	2.01	2.80

表-3.18 地震別変換係数

a	b	R^2
1.2255	2.4503	0.9964

この場合、式(3.21)と式(3.22)から式(3.25)が導出される。また、表-3.16から式(3.25)のパラメータ α' 、 β' は、表-3.19のとおりとなる。

$$P' = (a\alpha)I + (a\beta + b) = \alpha'I + \beta' \quad (3.25)$$

いま、山崎らの東日本大震災における橋梁添架管路の被害率を P_{bd} (%) とする⁷⁰⁾。また、表-3.19で橋梁の α' 、 β' から、式(3.25)によって算出された被害率を P_b' (件/km)として、 P_b' と P_{bd} を比較する。山崎らの被害率 P_{bd} (%)は、管路の設置箇所に対する被害箇所の割合となっているため、 P_b' と P_{bd} の単位は異なるが、同一の考え方であることから、 P_b' と P_{bd} を線形性として取り扱うこととする。更に、地震（東日本大震災）と構造物（橋梁）が同対象であることから、パラメータ c 、 d から成る線形モデル式と仮定すると、式(3.26)のとおりとなる。

$$P_{bd} = cP_b' + d \quad (3.26)$$

式(3.26)を最小二乗法により、 c 、 d を算出すると、表-3.20のとおりとなる。 R^2 は、決定係数である。この結果より、 P_b' と P_{bd} の関係を表す線形モデル式(3.26)における単回帰分析の精度が非常に高いことから、 P_b' と P_{bd} の関係式として式(3.26)を適用する。

表-3.19 各構造物の被害関数係数（東日本大震災）

構造物区分	α'	β'
分類なし	1.73	-7.98
橋梁	1.80	-9.52
トンネル	1.32	-6.66

表-3.20 橋梁と橋梁添架管路の変換係数

c	d	R^2
0.0733	0.1118	0.9999

本来は、構造物区分で c , d を算出するべきであるが、トンネル添架管路のデータがないため、構造物の添架物に均等な被害が発生したと仮定し、表-3.20 の c , d を定数とする。

ここで、トンネル添架管路の被害率を $P_{td}(\%)$ として、表-3.19 でトンネルの被害率を P_t' (件/km)とした場合、式(3.27)から P_{td} が算出される。

$$P_{td} = cP_t' + d \quad (3.27)$$

震度別の P_{bd} と P_{td} は、表-3.21 のとおりである。これより、トンネル照明灯具の被害率は、表-3.21 の P_{td} を適用する。

表-3.21 構造物添架管路の震度別被害率

震度	I	P_{bd}	P_{td}
5弱	4.75	4%	8%
5強	5.25	11%	13%
6弱	5.75	17%	18%
6強	6.25	24%	23%

(2)被害後健全度の算出

一般の道路トンネルにおいて、約 2,000(m)のトンネルチューブが保有する照明灯具は、約 1,000(灯)である。このため、被害後の健全度の算出にあたっては、1,000(灯)を基本単位数とする。この基本単位数で被害想定される照明灯具数は、(1)の被害率から算出し、本モデルで算出される各状態確率を修正することとした。被害後健全度の詳細な算出方法は、次のとおりである。

いま、経年劣化による状態確率を $P_i^n (i = A, B, C, D)$ とし、経年劣化に地震リスクを加味した被害後の状態確率を $P_i^d (i = A, B, C, D, E)$ とする。ここで、状態 E は、地震による被害が発生した場合にのみ適用される状態とする。被害後の修復優先度は、緊急の点検で判定された状態の悪い順に ($E \rightarrow D \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow A$) とする。各状態 (A, B, C, D, E) の内容は、表-3.22 のとおりである。

これより、任意の経過年での劣化による各状態の状態数を $N_i^n (i = A, B, C, D)$ 、被害後の各状態の状態数を $N_i^d (i = A, B, C, D, E)$ としたとき、 $N_i^d (i = A, B, C, D)$ は、式(3.28)から式(3.31)のとおりとなる。

① $N_D^n \geq N_E^d$ の場合

$$N_D^d = N_D^n - N_E^d, N_C^d = N_C^n, N_B^d = N_B^n, N_A^d = N_A^n \quad (3.28)$$

② $N_D^n + N_C^n \geq N_E^d > N_D^n$ の場合

$$N_D^d = 0, N_C^d = N_D^n + N_C^n - N_E^d, N_B^d = N_B^n, N_A^d = N_A^n \quad (3.29)$$

③ $N_D^n + N_C^n + N_B^n \geq N_E^d > N_D^n + N_C^n$ の場合

$$N_D^d = 0, N_C^d = 0, N_B^d = N_D^n + N_C^n + N_B^n - N_E^d, N_A^d = N_A^n \quad (3.30)$$

④ $N_D^n + N_C^n + N_B^n + N_A^n \geq N_E^d > N_D^n + N_C^n + N_B^n$ の場合

$$N_D^d = 0, N_C^d = 0, N_B^d = 0, N_A^d = N_D^n + N_C^n + N_B^n + N_A^n - N_E^d \quad (3.31)$$

表-3.22 被害後状態判定区分表

状態区分	状態内容
E	地震被害による機能不能、並びに落下等により、緊急更新を余儀なくする必要がある状態
D	損傷や腐食等が見受けられ、構造的機能低下も著しいため、緊急に補修等の必要がある状態
C	損傷や腐食等が見受けられ、構造的機能低下も見られるため、補修等の必要がある状態
B	損傷や腐食等が見受けられるが、構造的機能低下が見られないため、補修等の必要がない状態
A	損傷や腐食等が見受けられない状態

ここで、上記の具体例として、第5節健全度算出適用事例の結果から、設置後7年の鋼板製照明灯具における経年劣化と地震被害（震度5弱）の状態数を示す。この場合、被害後の状態Eの状態数 $N_E^d=80$ ，劣化の状態Dの状態数 $N_D^u=112$ より、式(3.28)を適用して、表-3.23のとおりとなる。本例では、式(3.28)を適用のため、被害後状態Eへの遷移が劣化の状態Dからのみになっている。なお、劣化の各状態から被害後の状態Eへの遷移は、次の①～④とおりである。

①式(3.28)適用時

状態D → 状態E

②式(3.29)適用時

状態C → 状態E, 状態D → 状態E

③式(3.30)適用時

状態B → 状態E, 状態C → 状態E, 状態D → 状態E

④式(3.31)適用時

状態A → 状態E, 状態B → 状態E, 状態C → 状態E, 状態D → 状態E

このように経年劣化の状態数を経過年毎に修正した被害後の状態数 N_i^d ($i = A, B, C, D, E$) から状態確率 P_i^d ($i = A, B, C, D, E$) を求めて、震度別被害後健全度を算出する。なお、健全度算出にあたっては、第5節健全度算出適用事例から本モデルを用いる。本モデルの適用による鋼板製とステンレス鋼板製の経過年毎における震度別被害後健全度は、図-3.14と図-3.15のとおりとなる。このように、被害後健全度は、自然劣化の健全度である図-3.8に依存した推移をしている。自然劣化の健全度は、状態C (30%)からの補修によって、一定値化する傾向にある。このため、鋼板製では、経過20年程度で、ステンレス鋼板製では、経過40年程度で一定値化している。これらより、地震リスクにおける被害健全度には、自然劣化の健全度が大きく関係していることが明確である。よって、自然劣化対応である補修や更新は、地震リスクの軽減にも寄与するため、予防保全を再認識した確実な対応が必要であることが理解できるものとなっている。

表-3.23 経年劣化と被害後の状態数

状態	A	B	C	D	E
経年劣化	68	45	775	112	0
地震被害	68	45	775	32	80

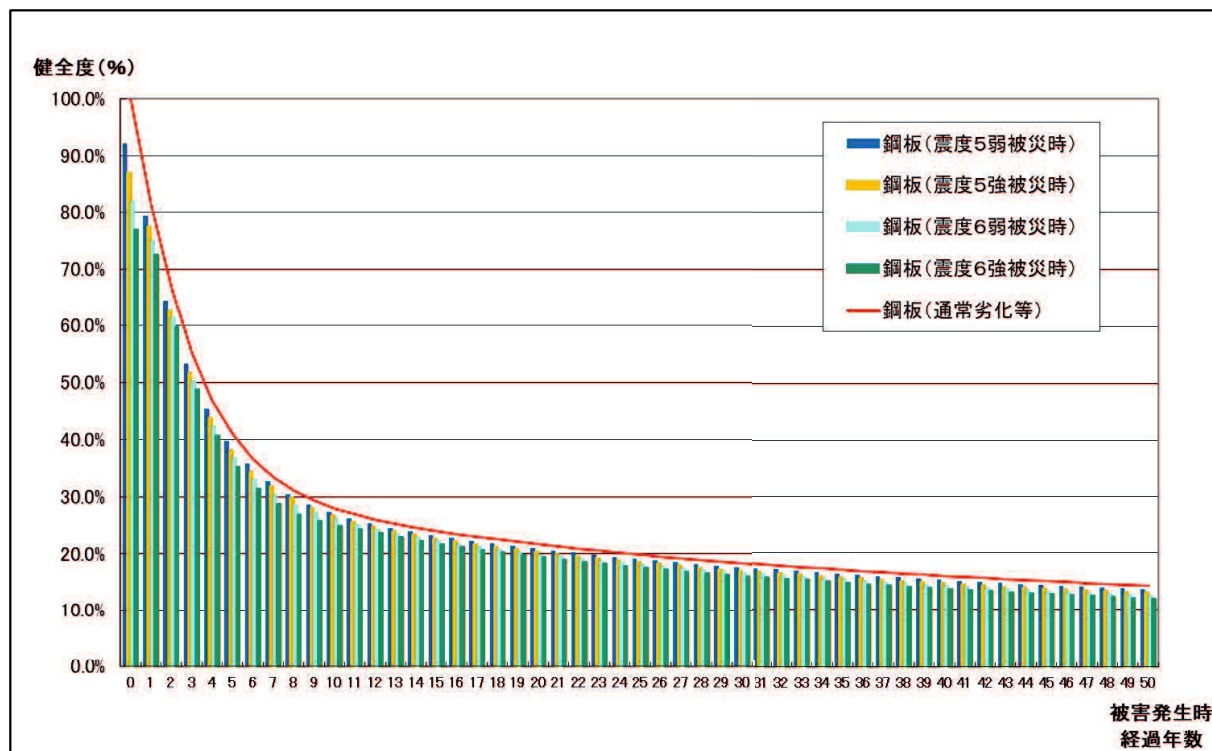


図-3.14 鋼板製震度別被害後健全度

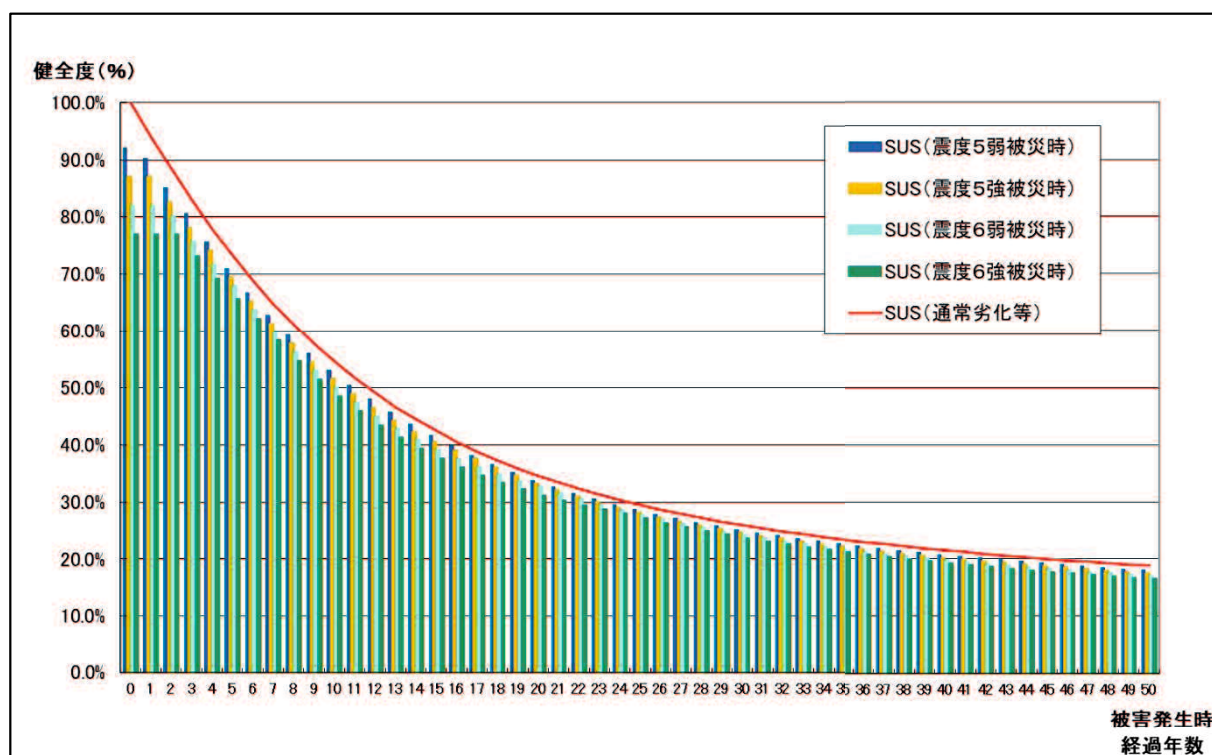


図-3.15 ステンレス鋼板製震度別被害後健全度

(3)復旧額と回復健全度の算出

被害後の各状態数や状態確率を用いて、コストマネジメントを検討する。各状態の概要は、表-3.22 のとおりであるが、地震の衝撃や振動等に劣化の影響を考慮した復旧の詳細内容を次のとおり区分する。

①状態 E

地震の衝撃や振動等により，電気配線の断線，発光部の機能不全，設置部の取付金具・アンカーの脱着，並びに筐体・透明カバーの損傷による落下等の危険性から全更新対象とする。

②状態 D

地震の衝撃や振動等により，設置部の取付金具・アンカーの亀裂や損傷，並びに筐体部の損傷のような劣化部の悪化による落下等の危険性から全更新対象とする。

③状態 C

地震の衝撃や振動等により，設置部の取付金具・アンカーの亀裂や損傷，並びに筐体部の損傷のような劣化部の悪化はあるが，落下等の危険性はないため，緊急補修対象とする。

上記区分は，地震の被害状況から復旧の範囲や方法で相違があると想定されるが，本論文では，照明灯具を対象としているため，上記区分で各状態における材質別の照明灯具あたり更新及び補修想定費用を表-3.24のとおりとする。なお，災害時における公共土木施設の復旧事業費は，公共土木施設災害復旧事業費国庫負担法第2条第2項から，原則として原形復旧することが基本となっている。このため，本論文においても更新費及び補修費は，原形復旧に要するための費用とする。また，灯具設置部におけるコンクリート被害については，資産会計の観点からトンネル本体の被害復旧とし，本検討に対する復旧費用には含まないものとする。これより，経過年毎の震度別想定復旧額は，材質別の図-3.14と図-3.15の震度別被害後健全度と表-3.24の補修想定費用を用いて算出すると，鋼板製とステンレス鋼板製で図-3.16と図-3.17のとおりとなる。

表-3.24 被害後状態別復旧想定費用（灯具材質別）

灯具材質	復旧費用（百万円/灯）				
	状態 A	状態 B	状態 C	状態 D	状態 E
鋼板製	0	0	0.05	0.20	0.20
ステンレス鋼板製	0	0	0.05	0.25	0.25

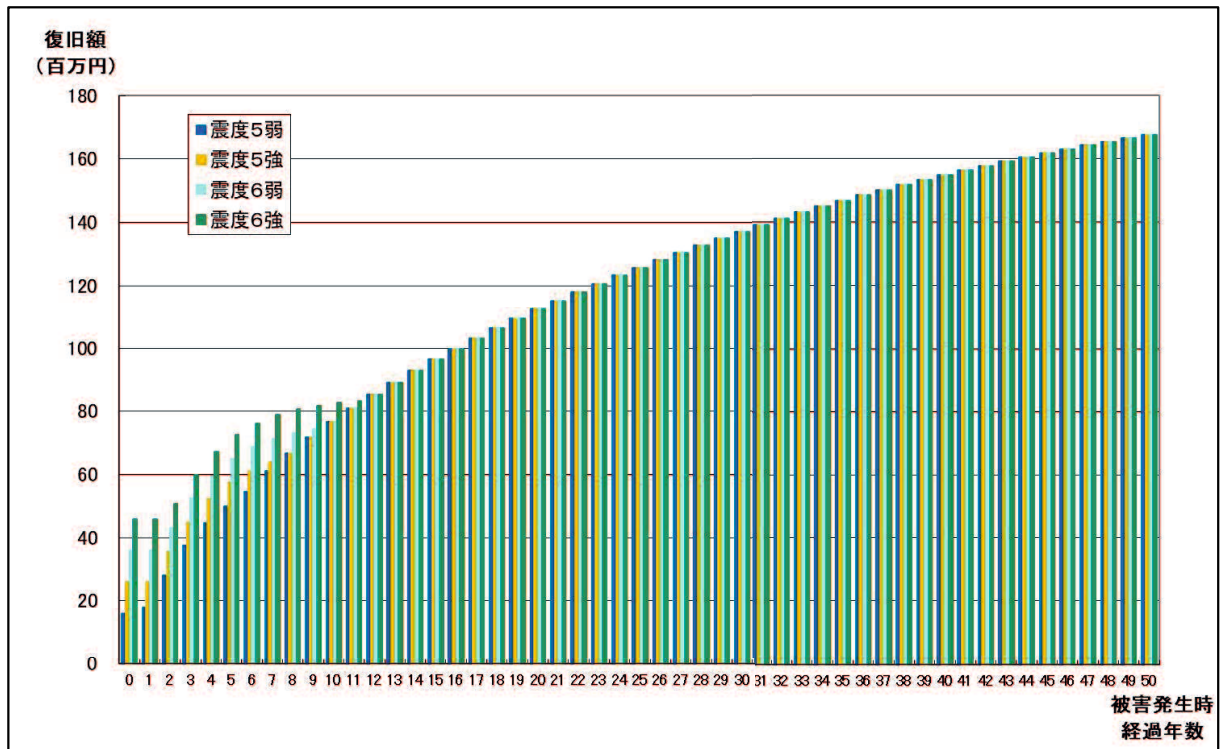


図-3.16 鋼板製震度別想定復旧額

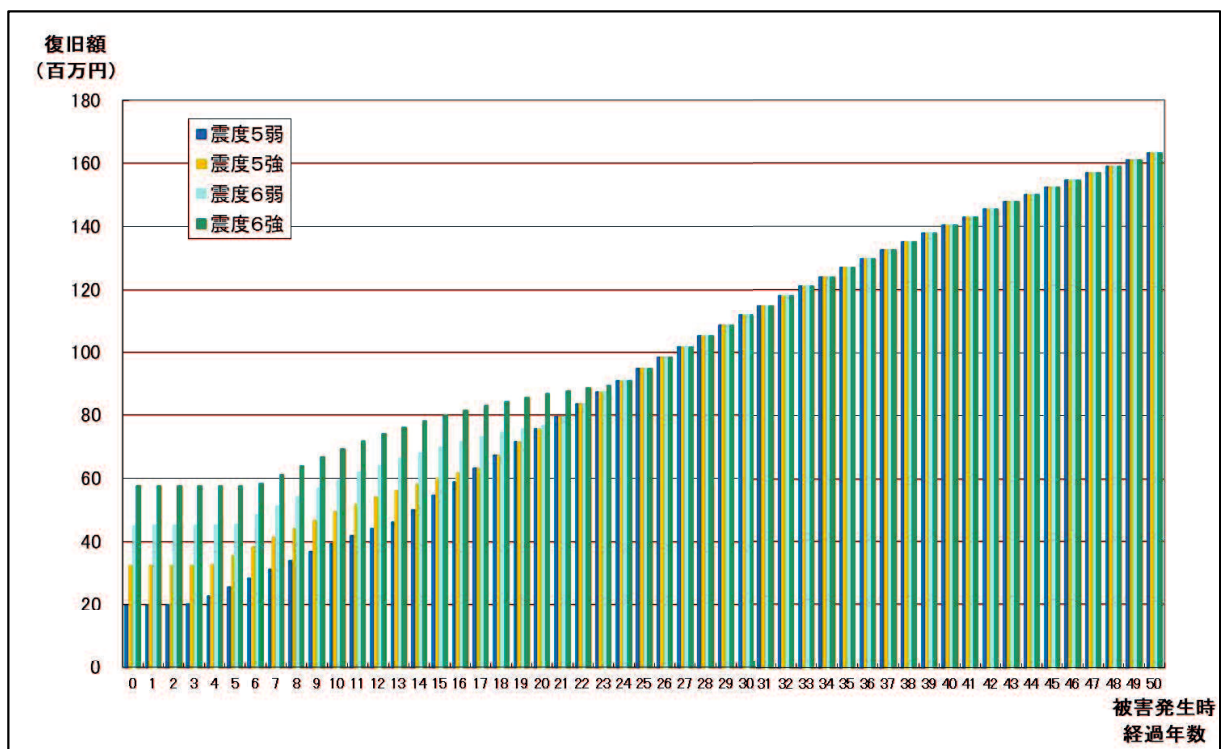


図-3.17 ステンレス鋼板製震度別想定復旧額

次に復旧による回復健全度の算出方法と設定条件を示す。一般に、地震発生後の社会基盤施設における復旧は、被害後の社会経済状況に多大な影響が発生することから迅速に実施される。これより、復旧作業は、同年内で実施・完了すると考慮される。本論文では、地震発生年と同年内に全復旧完了とする。この条件より、被害後から復旧後の各状態遷移のパターンについては、表-3.25 のとおりとなる。これは、上述したように、被害後の状態 *E* と状態 *D* の復旧内容が全更新であることから、復旧後には状態 *A* に遷移している。また、被害後の状態 *C*、状態 *B*、並びに状態 *A* の復旧内容は、緊急補修や点検程度であるため、復旧後の各状態は現状維持となっている。ここで、被害後の健全度と復旧後の健全度の差分を復旧による回復健全度と定義する。この定義より、鋼板製とステンレス鋼板製での経過年毎における震度別の回復健全度を算出すると、図-3.18 と図-3.19 のとおりとなる。

表-3.25 状態遷移パターン

状態遷移パターン	被害状態	復旧状態
1	<i>A</i>	<i>A</i>
2	<i>B</i>	<i>B</i>
3	<i>C</i>	<i>C</i>
4	<i>D</i>	<i>A</i>
5	<i>E</i>	<i>A</i>

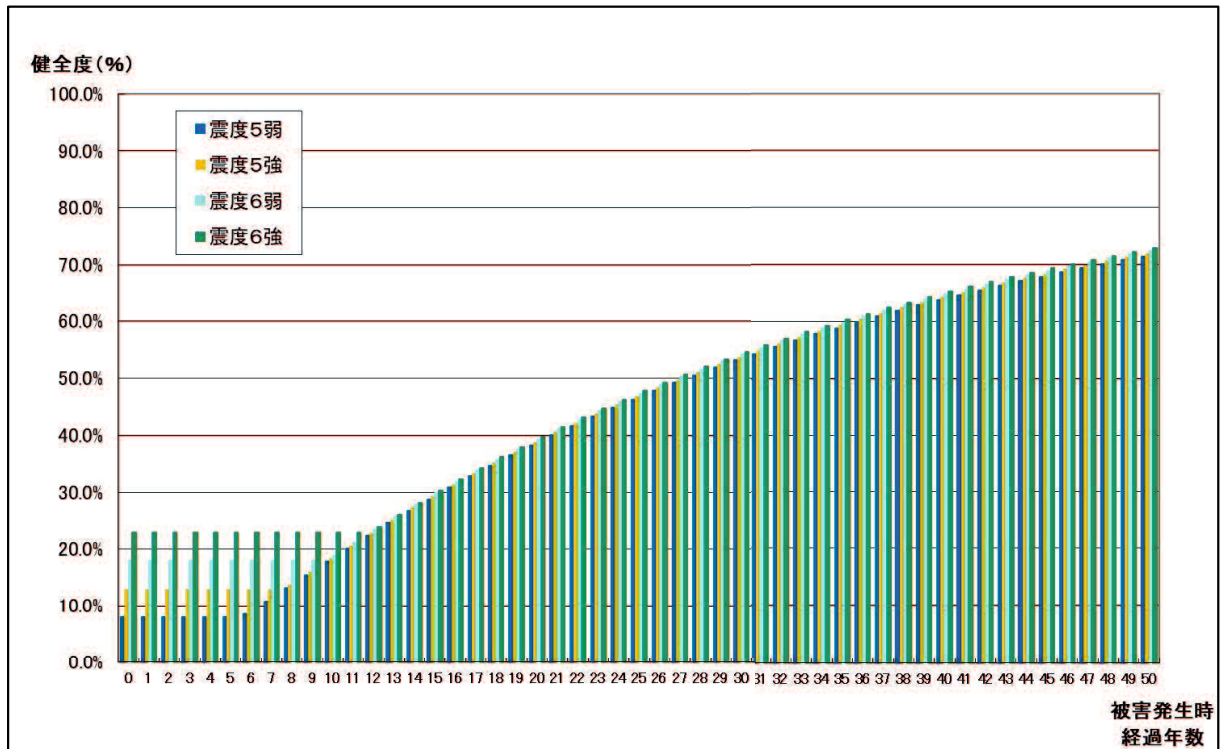


図-3.18 鋼板製震度別想定回復健全度

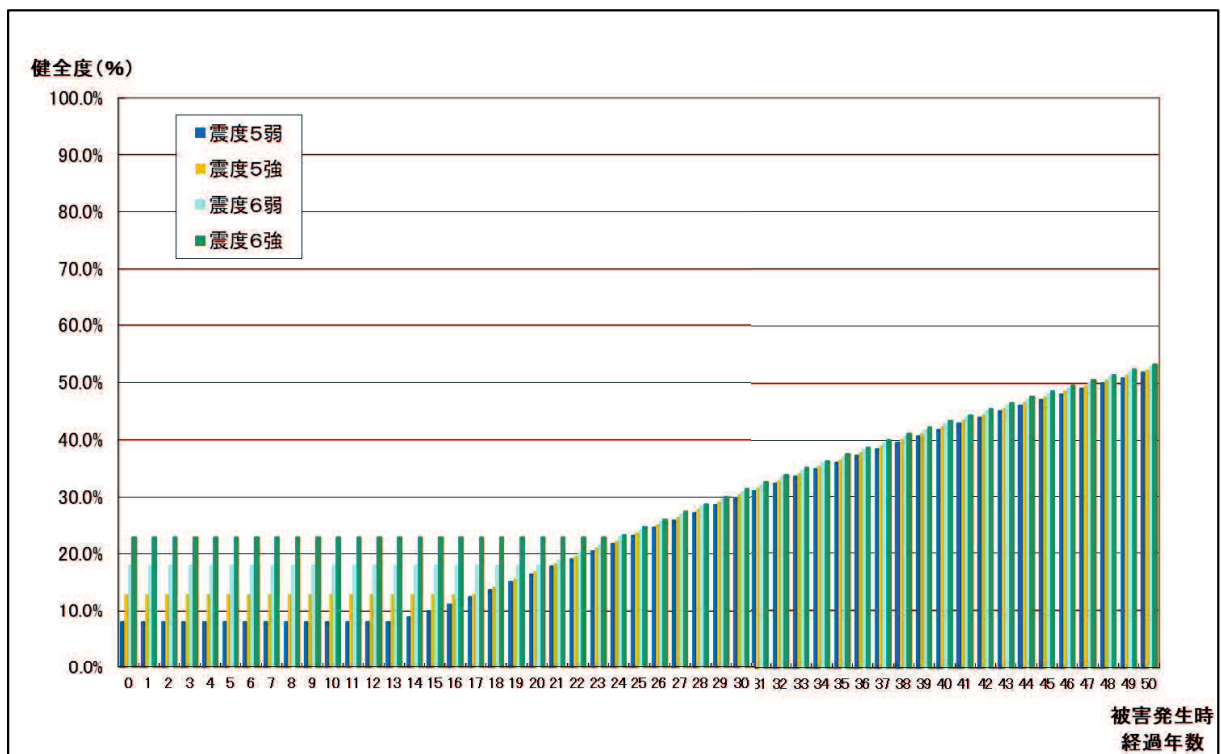


図-3.19 ステンレス鋼板製震度別想定回復健全度

(4)復旧コスト有効度の算出

復旧コストの有益性（コスト価値）を示すマネジメント指標としてコスト有効度を導入する。いま、想定される復旧額 SE と回復健全度 RH における復旧コスト有効度 CE は、式 (3.32) で示される。これより、鋼板製とステンレス鋼板製での震度別復旧コスト有効度は、図-3.20 と図-3.21 のとおりとなる。

$$CE = \frac{RH}{SE} \quad (3.32)$$

(5)全更新適正時期の検討

(1)～(4)より、経年劣化に地震リスクを加味した本モデルでの詳細手法とその結果について示した。これらの結果から、全更新の適正時期について検討する。本検討では、定量指標として被害後健全度と復旧コスト有効度を用いる。その際、各指標の閾値は、第5節健全度算出適用事例の考え方を適用し、被害後健全度 30(%)と復旧コスト有効度 30(%/億円)を全更新検討の閾値とする。この閾値を用いて、照明灯具の材質毎に検討する。

①鋼板製の場合

・被害後健全度からの検討

(2)の結果より、被害後健全度が閾値（被害後健全度 30(%)）以下となる発生時経過年は、震度 5 弱では 9 年以降、震度 5 強と震度 6 弱では 8 年以降、震度 6 強では 7 年以降となる。この経過年以降で地震が発生した場合は、各灯具の機能状況や落下等の安全性から全更新の検討が必要である。

・復旧コスト有効度からの検討

(4)の結果より、復旧コスト有効度は、各震度とも同様の深い井戸型カーブとなっている。閾値（復旧コスト有効度 30(%/億円)）以上となる発生時の経過年は、震度 5 弱では 0～1 年と 16 年以降、震度 5 強では 0～2 年と 15 年以降、震度 6 弱では 0～4 年と 15 年以降、震度 6 強では 0～6 年と 14 年以降となる。経過 0～6 年では、劣化による健全度は 35(%) を超えているため、劣化の影響は少ないことから、地震の被害による部分更新が復旧作業の大部分となる。これより、復旧コスト有効度から全更新の検討が必要となる時期は、震度 5 弱では 16 年以降、震度 5 強と震度 6 弱では 15 年以降、震度 6 強では 14 年以降となる。

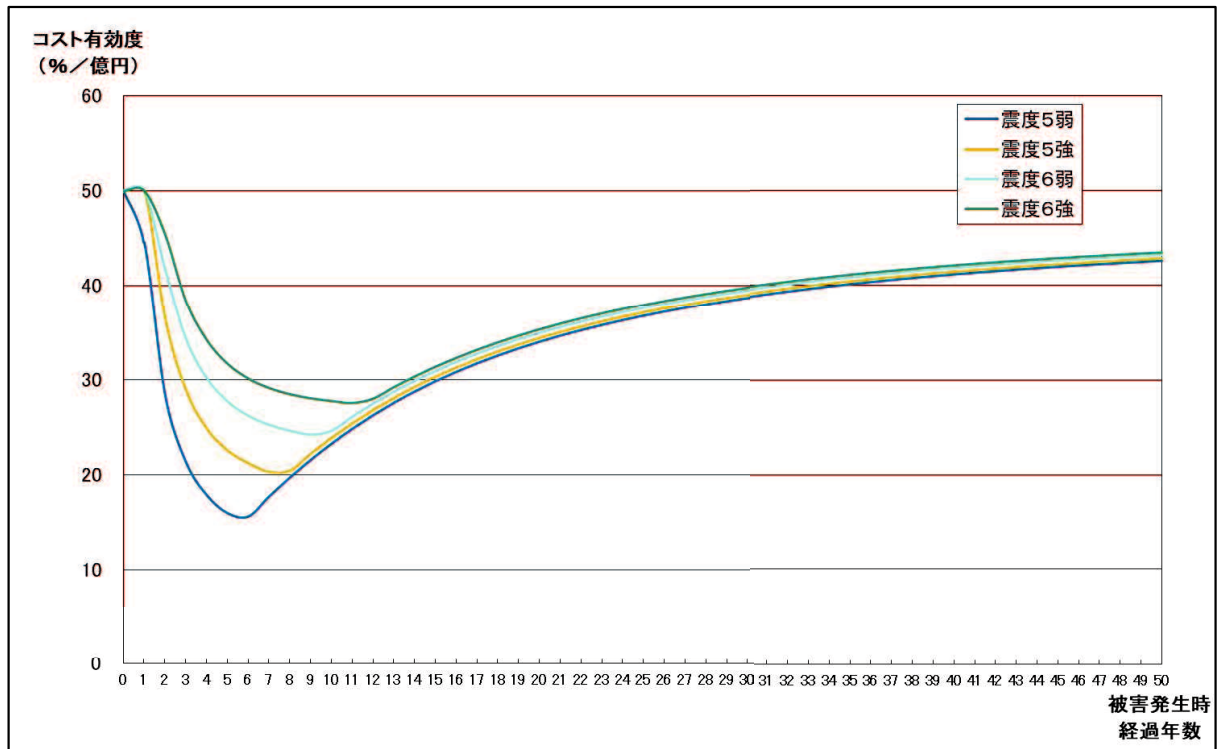


図-3.20 鋼板製震度別復旧コスト有効度

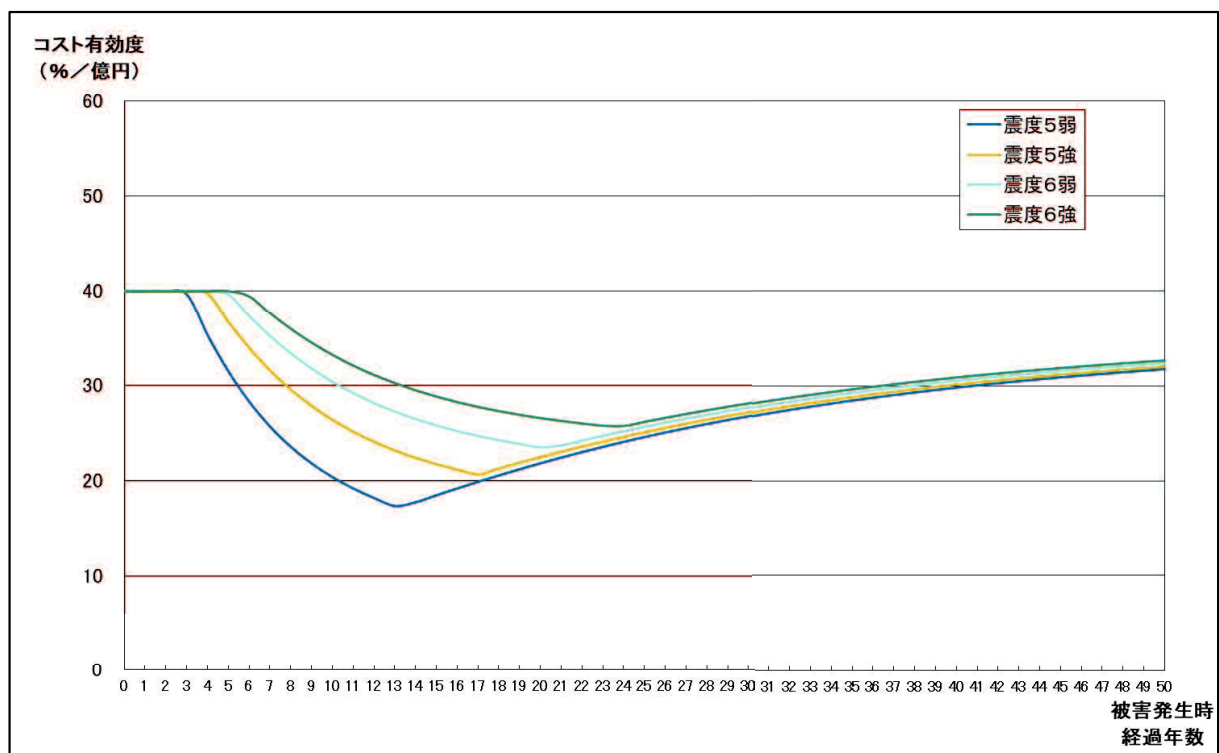


図-3.21 ステンレス鋼板製震度別復旧コスト有効度

・総合性からの検討

上記より、健全性と経済性を踏まえた総合性（以下、「総合性」という）の観点で被害後健全度から全更新を検討する。発生時経過年で、震度5弱の9～15年、震度5強と震度6弱の8～14年、震度6強の7～13年は、被害後健全度では閾値以上で復旧コスト有効度では閾値未満である。これより、各灯具の被害による機能状況や落下等の安全性を確認した上で、十分なコストマネジメントによる可否の決定が必要である。なお、発生時の経過年で震度5弱の16年以降、震度5強と震度6弱での15年以降、震度6強の14年以降は、全更新が適切であると考慮される。

②ステンレス鋼製の場合

・被害後健全度からの検討

(2)の結果より、被害後健全度が閾値（被害後健全度30%）以下となる発生時経過年は、震度5弱と震度5強では24年以降、震度6弱では23年以降、震度6強では22年以降となる。この経過年以降で地震が発生した場合は、各灯具の機能状況や落下等の安全性から全更新の検討が必要である。

・復旧コスト有効度からの検討

(4)の結果より、復旧コスト有効度は、各震度とも同様の逆凸型カーブとなっている。閾値（復旧コスト有効度30%/億円）以上となる発生時の経過年は、震度5弱では0～5年と41年以降、震度5強では0～7年と40年以降、震度6弱では0～10年と38年以降、震度6強では0～13年と37年以降となる。経過0～13年では、劣化による健全度は45%を超えているため、劣化の影響はないことから、地震の被害による部分更新が復旧作業の大部分となる。これより、復旧コスト有効度から全更新の検討が必要となる時期は、震度5弱では41年以降、震度5強では40年以降、震度6弱では38年以降、震度6強では37年以降となる。

・総合性からの検討

上記より、総合性の観点で被害後健全度から全更新を検討する必要がある。発生時経過年で、震度5弱の24～40年、震度5強の24～39年、震度6弱の23～37年、震度6強の22～36年は、被害後健全度では閾値以上で復旧コスト有効度では閾値未満である。これより、各灯具の被害による機能状況や落下等の安全性を確認した上で、十分なコストマネジメントによる可否の決定が必要である。なお、発生時の経過年で震度5弱の41年以降、震度5強の40年以降、震度6弱の38年以降、震度6強の37年以降は、全更新が適切であると考慮される。

7. 5 結論

本節では、本モデルの経年劣化に地震リスクを加味した適用事例として、健全性と経済性の指標である被害後健全度と復旧コスト有効度を算出し、各指標の閾値から全照明灯具更新時期のマネジメント手法を示した。なお、本手法による材質別の全照明灯具更新の適正時期は、表-3.26 のとおりである。これにより、経年劣化にイベント・リスクを加味した場合での本モデルの対応性とマネジメントの可能性を示した。しかし、実際の地震による被害状況は複雑であるため、安全性の観点から各照明灯具の健全度は、被害後の状態を十分に調査して対応方法を検討することが重要である。また、被害の拡大化につれて復旧範囲も拡大化するため、経済性の観点から復旧コストは、安易に更新するのではなく、各部位での被害後の状態を踏まえて、部分更新や補修等による低減化を図ることが重要である。

表-3.26 全灯具更新時期（灯具材質別）

灯具材質	震度5弱		震度5強		震度6弱		震度6強	
	被害後健全度	復旧コスト有効度	被害後健全度	復旧コスト有効度	被害後健全度	復旧コスト有効度	被害後健全度	復旧コスト有効度
鋼板製	9年以降	16年以降	8年以降	15年以降	8年以降	15年以降	7年以降	14年以降
ステンレス鋼板製	24年以降	41年以降	24年以降	40年以降	23年以降	38年以降	22年以降	37年以降

第8節 まとめ

本章では、第2章第3節3.1 狭義的マネジメント課題対応の具体手法として、狭義的マネジメントの重要ツールとなる健全度予測モデルとその解析手法を中心に提案したものである。本提案には、第2章第3節3.1 狭義的マネジメント課題を踏まえて、次の2点を重視したものとなっている。

第1点目は、狭義的マネジメント関係者の全視点から、対象物の劣化や損傷の状態を同認識で共有できる簡易性や実用性のあるモデルとした。

第2点目は、マネジメントの定着と品質向上の観点から、実際の点検データにおける課題であるデータ量の僅少性やデータ内容の精度に応じた簡易性と拡張性のあるモデルとした。これらの条件を踏まえて、本モデルを提案したものである。

本モデルの実際の点検データへの対応内容は、第5節～第7節の適用事例からも理解できるように、狭義的マネジメントの課題に対応可能なツールとなること示した。具体内容は、次のとおりである。

第5節の適用事例では、本モデルで現状の点検データに応じた健全度算出が可能となり、現時点の状態把握や更新・補修計画策定等の狭義的マネジメントにおける重要ツールとなることを示した。

第6節の適用事例では、劣化速度が早い鋼板製の灯具の延命化を目的に、簡易補修による予防保全での最適補修率を算出することで、本モデルの補修対応策検討への適用性を示した。

本章第7節の適用事例では、イベント・リスクとしての地震リスクを対象に、地震リスクを加味した健全度予測と更新時期を算出することで、本モデルの災害リスクを加味したマネジメント対応にも適用可能であることを示した。

これらの適用事例は、本モデルの狭義的マネジメントの領域拡大に応じた適用性を有することを示している。

しかしながら、狭義的マネジメントの品質向上には、基本となる点検データ等の各種データの精度向上と本モデルが活用可能となるデータ蓄積が必須である。また、本モデルのマネジメント運用での課題は、データ精度とデータ蓄積の実効性へと繋がるものである。これらから、本モデルは、結果検証とそのフィードバックが可能となり、本モデルの適用性や拡張性の向上による実効的な狭義的マネジメントが期待できるものである。

参考文献

- 1) 上村敏之：公共経済学入門，新世社，2011.
- 2) 晴山一穂：公共性概念に関する一考察，専修法学論集，Vol.106，No.1，pp.53-80，2009.
- 3) 衣笠達夫：公共性に関する一考察，日本計画行政学会関西支部年報，Vol.32，No.1，pp.1-15，2012.
- 4) 橋爪大三郎：公共性とは何か，社会学評論，Vol.50，No.4，pp.451-463，2000.
- 5) 長谷川公一：共同性と公共性の現代的位相，社会学評論，Vol.50，No.4，pp.436-450，2000.
- 6) 齋藤純一：公共性，岩波書店，2000.
- 7) 今井重孝：比較教育学方法論に関する一考察－「一般化」志向と「差異化」志向を軸として－，比較教育学研究，Vol.1990，No.16，pp.19-29，1990.
- 8) 久保慶一：ディシプリンと地域研究－比較政治学の視点から－，地域研究，Vol.12，No.2，pp.164-180，2012.
- 9) 田口茂：＜差異＞によって＜同じさ＞を定義する－現象学的考察－，日本認知科学学会大会発表論文集，Vol.34，No.1，pp.343-349，2017.
- 10) 国土交通省：国土交通省所管分野における社会資本の将来の維持管理・更新費の推計，インフラメンテナンス情報，社会資本の老朽化の現状と将来，2018.
<https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/_pdf/research01_02_pdf02.pdf (参照 2021-06-06) >
- 11) 国土交通省編：令和2年度版国土交通白書，日経印刷，2020.
- 12) ジェラルド・M. ワインバーグ (松田武彦監訳，増田伸爾訳)：一般システム思考入門，紀伊國屋書店，1979.
- 13) フォン・ベルタランフィ (長野敬，太田邦昌訳)：一般システム理論，みすず書房，1973.
- 14) 合原一幸，井村順一，堀尾喜彦，鈴木秀幸，寶来俊介：複雑系数理モデル学の基礎理論構築とその分野横断的の科学技術応用，電子情報通信学会基礎・境界ソサイエティ Fundamentals Review，Vol.8，No.4，pp.218-228，2015.
- 15) 貝戸清之，阿部允，藤野陽三：実測データに基づく構造物の劣化予測，土木学会論文集，No.744/IV，pp.29-38，2003.

- 16) 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, pp.69-82, 2005.
- 17) 青木一也, 山本浩司, 小林潔司: 劣化予測のためのハザードモデルの推計, 土木学会論文集, No.791/VI-67, pp.111-124, 2005.
- 18) 青木一也, 山本浩司, 津田尚胤, 小林潔司: 多段階ワイブル劣化ハザードモデル, 土木学会論文集, No.798/VI-68, pp.125-136, 2005.
- 19) 青木一也, 山本浩司, 小林潔司: トンネル照明システムの最適点検・更新政策, 土木学会論文集, No.805/VI-69, pp.105-116, 2005.
- 20) 貝戸清之, 小林潔司: マルコフ劣化ハザードモデルのベイズ推定, 土木学会論文集 A, Vol.63, No.2, pp.336-355, 2007.
- 21) 竹田俊明, 大島俊之, 佐藤誠, 三上修一: 橋梁点検実測データに基づく橋梁資産劣化予測評価の検討, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.51A, 2005.
- 22) 河村圭, 宮本文穂, 中村秀明, 小野正樹: Bridge Management System(BMS)における維持管理対策選定システムの開発, 土木学会論文集, No.658/VI-48, pp.121-139, 2000.
- 23) 古田均, 茅野牧夫, 渡邊英一: 橋梁の維持管理とブリッジマネジメントシステムの現状と将来展望, 土木学会論文集 F, Vol.63, No.3, pp.287-294, 2007.
- 24) 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 床版の最適維持管理計画支援システムに関する研究, 「材料」(J.Soc.Mat.Sci.,Japan), Vol.47, No.12, pp.1245-1250, 1998.
- 25) 古田均, 野村泰稔, 中津功一朗, 香川圭明, 内田昌宏: 橋梁群のアセットマネジメントにおける予定の変更を考慮した補修計画策定, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.1, No.2, pp.I_959-I_970, 2014.
- 26) 宮本文穂, 河村圭, 中村秀明: Bridge Management System(BMS)を利用した既存橋梁の最適維持管理計画の策定, 土木学会論文集, No.588/VI-38, pp.191-208, 1998.
- 27) 近田康夫, 新谷光平, 阿曾克司, 木戸隆良: GA を援用した橋梁群の経時的補修費用均等化に関する研究, 土木情報利用技術論文集, Vol.15, pp.193-198, 2006.
- 28) 小林潔司, 江口利幸, 大井明, 青木一也, 貝戸清之, 松村泰典: 舗装構造の最適補修更新モデル, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol.68, No.2, pp.54-68, 2012.
- 29) 宮崎文平, 加藤寛之, 小濱健吾, 貝戸清之, 風戸崇之, 田中克則: 膨大な路面性状調査データに基づく舗装補修施策の評価法の提案, 土木学会論文集 F4 (建設マネジメント), Vol.71, No.3, pp.142-161, 2015.

- 30) 谷口聡, 伊藤正秀, 野村敏明, 阿部忠行: 舗装データベースを用いた供用性曲線作成手法に関する研究, 土木学会舗装工学論文集, Vol.8, No.1, pp.99-106, 2003.
- 31) 堀倫裕, 小濱健吾, 貝戸清之, 小林潔司: 下水処理施設の最適点検・補修モデル, 土木計画学研究・論文集, Vol.25, No.1, pp.213-224, 2008.
- 32) 青木一也, 山本浩司, 小林潔司: 時間依存型劣化過程を有するシステムの集計的最適点検・補修モデル, 土木学会論文集 F, Vol.62, No.2, pp.240-257, 2006.
- 33) 藤倉規雄, 吉野隆, 水谷隆夫, 前田哲史: 劣化メカニズムを考慮した確率モデルによる最適な点検・補修時期の決定法, 土木学会論文集 D, Vol.66, No.1, pp.1-13, 2010.
- 34) 河村裕之, 太田隆夫, 松見吉晴, 小柳淳二, 佐藤毅: 累積損傷モデルによる消波工の最適予防保全レベル, 土木学会論文集 B2, Vol.74, No.2, pp.I_1075-I_1080, 2018.
- 35) 岩崎和弘, 浅井正, 宮地陽輔, 森橋真, 玉石宗生, 岩波光保: 予防保全型の維持管理による港湾施設のライフサイクルコスト削減効果に関する解析事例, 海洋開発論文集, Vol.24, No.1, pp.543-548, 2008.
- 36) 小牟禮健一, 濱田秀則, 横田弘, 山路徹: RC 栈橋上部工の塩害による劣化進行モデルの開発, コンクリート工学論文集, Vol.15, No.1, pp.13-22, 2004.
- 37) 古谷宏一, 横田弘, 橋本勝文, 花田祥一: マルコフ連鎖モデルを用いた係留施設の劣化進行予測の信頼性評価, 土木学会論文集 F4, Vol.67, No.4, pp.I_159-I_168, 2011.
- 38) Frangopol, D. M., Kallen, M. J. and van Noortwijk, J. M. : Probabilistic Models for Life-Cycle Performance of Deteriorating Structures, Progress in Structural Engineering and Materials, Vol.6, pp.197-212, 2004.
- 39) Shin, H.C. and Madanat, S. : Development of a stochastic model of pavement distress initiation, Journal of Infrastructure Planning and Management, No.744/IV-61, pp.61-67, 2003.
- 40) Mishalani, R. and Gong, L. : Impacts of design and material quality on pavement rutting progression, Journal of Infrastructure Planning and Management, No.744/IV-61, pp.69-75, 2003.
- 41) Van den Boomen, M., Schoenmaker, R. and Wolfert, A. R. M. : A Life Cycle Costing Approach for Discounting in Age and Interval Replacement Optimisation Models for Civil Infrastructure Assets, Structure and Infrastructure Engineering, Vol.14, No.1, pp.1-13, 2018.
- 42) Thoft-Christensen, P. : Life-Cycle Cost-Benefit Analysis of Bridges from a User and Social Point of View, Structure and Infrastructure Engineering, Vol.5, No.1, pp.49-57, 2009.
- 43) 平石邦彦: 形式的モデル化—離散事象／実時間／ハイブリッドシステムのモデル化と解析—, 森北出版, 2019.
- 44) 岩下基: システム方法論—システムの的なものの見方・考え方—, コロナ社, 2014.

- 45) 今村遼平：フィールドロジー（現場の知）－現場での見方・考え方－，電気書院，2006.
- 46) 為近和彦：熱・統計力学，森北出版，2008.
- 47) 堂寺知成：工学基礎 熱力学・統計力学，数理工学社，2009.
- 48) 長屋政勝：統計的集団と同種性－ドイツ社会統計学における同種性論争(1)－，京都大学経済学会経済論叢，Vol.143，No.6，pp.344-372，1989.
- 49) 長屋政勝：同種性と本質同等性－ドイツ社会統計学における同種性論争(2)－，京都大学経済学会経済論叢，Vol.144，No.2，pp.155-179，1989.
- 50) 長屋政勝：同種性と構造同等性－ドイツ社会統計学における同種性論争(3・完)－，京都大学経済学会経済論叢，Vol.145，No.1-2，pp.46-72，1990.
- 51) 有田正三：統計的集団に於ける形式的同種性，京都大学経済学会経済論叢，Vol.48，No.5，pp.861-865，1939.
- 52) 有田正三：ジージェックと形式的同種性の問題，京都大学経済学会経済論叢，Vol.52，No.2，pp.245-259，1941.
- 53) 小野寺勝重：保全性設計技術と保全性設計プログラム，精密工学会誌，Vol.65，No.3，pp.364-367，1999.
- 54) 森地茂，目黒浩一郎，小川圭一：一般化平均概念を用いた交通情報提供の影響分析手法に関する研究，土木学会論文集，No.555/IV-34，pp.15-26，1997.
- 55) 岩淵千明，浦光博，石井滋，西田公昭，神山貴弥：あなたもできるデータの処理と解析，福村出版，1997.
- 56) 張興和：データ分析で常用される4種類の平均の使い分け－算術平均・幾何平均・調和平均・平方平均－，旭川大学経済学部紀要，第78号，pp.43-59，2019.
- 57) 藤井久矢，田中新也，古田均，堂垣正博：地震リスクを加味した劣化損傷下にある道路橋梁群の維持管理，「材料」(Journal of the Society of Materials Science, Japan)，Vol.61，No.2，pp.133-140，2012.
- 58) 高橋和也，藤井久矢，古田均，堂垣正博：既設RC橋脚の地震リスクを勘案した維持管理戦略，「材料」(Journal of the Society of Materials Science, Japan)，Vol.63，No.2，pp.110-116，2014.
- 59) 常井裕也：地震リスクを考慮した下水道管理施設のアセットマネジメントに関する研究，土木学会論文集 A1(構造・地震工学)，Vol.71，No.4（地震工学論文集第34巻），pp.I_873-I_884，2015.

- 60) 南貴大, 藤生慎, 中山晶一郎, 高山純一: 地震リスクを考慮した橋梁の補修優先度決定法の提案, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.72, No.4 (地震工学論文集第35巻), pp.I_700-I_707, 2016.
- 61) 他谷周一, 翠川三郎: 構造種別を考慮した鉄道構造物の地震被害関数の検討, 日本地震工学会論文集, Vol.14, No.1, pp.71-84, 2014.
- 62) Tesfamariam, S. and Goda, K. : Handbook of Seismic Risk Analysis and Management of Civil Infrastructure Systems, Woodhead Publishing Limited, 2013.
- 63) Mayet, J. and Madanat, S. : Incorporation of seismic considerations in bridge management systems, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol. 17, No. 3, pp. 185-193, 2002.
- 64) Karlaftis, M.G., Kepaptsoglou, K. L. and Lambropoulos, S. : Fund Allocation for Transportation Network Recovery Following Natural Disasters, Journal of Urban Planning and Development, Vol. 133, No. 1, pp. 82-89, 2007.
- 65) Small, E. P. : Examination of Alternative Strategies for Integration of Seismic Risk Considerations in Bridge Management Systems, TRB Transportation Research Circular, Vol. 498, No. E-4, pp. 1-16, 2000.
- 66) Baker, J. W. and Cornell, C. A. : Uncertainty propagation in probabilistic seismic loss estimation, Structural Safety, Vol. 30, No. 3, pp. 236-252, 2008.
- 67) Goda, K. and Hong, H. P. : Optimal Seismic Design Considering Risk Attitude, Societal Tolerable Risk Level, and Life Quality Criterion, Journal of Structural Engineering, Vol. 132, No. 12, pp. 2027-2035, 2006.
- 68) 安藤哲也, 川口智也: 老朽化と地震による被害想定を一体的に考慮したストックマネジメントの評価手法に関する一事例, 全国上下水道コンサルタント協会技術報告集, No.31, pp.54-59, 2017.
- 69) 矢代晴実編: 震災工学—被害想定・リスクマネジメントからみた地震災害—, コロナ社, 2016.
- 70) 山崎泰司, 瀬川信博, 石田直之, 鈴木崇伸: 東日本大震災における電気通信土木設備の被害状況に関する考察, 日本地震工学会論文集, Vol.12, No.5 (特集号), pp.55-68, 2012.

第4章

広義的観点からの提案

第4章 広義的観点からの提案

第1節 提案概要

第2章で、広義的マネジメントは、狭義的マネジメントと関連し、包括したマネジメントであることを解説した。そして、広義的マネジメントの主要課題は、資産管理における効率的なマネジメント体制の確立であった。そのためには、効率の生態的解釈を踏まえた、内外環境変化に対応した価値マネジメントを形成することであった。

これらを踏まえて、本章では、上記課題の具体手法として、実効的なマネジメント形成における具体手法を提案するものである。但し、広義的マネジメントは、物的及び人的な経営資源管理であるため、企業組織全体におけるマネジメントが対象となっている。このため、狭義的マネジメントのような理論的提案に対する実績データでの検証は、組織全体での取り組みによってのみ実現可能となる。これは、本論文範囲を超越しているため、経営品質的観点での理論的提案の範囲に留めるものとする。

一般に、我が国の企業組織は、企業内における各ネットワークを基盤に企業内階級層間におけるコミュニケーションを基軸とした戦略生成とその実行が特徴である。これは、国際的に比較しても日本企業がオペレーションを中核としたものとなっていることに起因している。このオペレーションの効率的な実効アイテムが、マネジメントシステムである¹⁾。そして、この視点で社会基盤施設の資産管理に適用したものが、アセットマネジメントシステムの広義的マネジメントであった²⁾。そして、このマネジメント運営には、組織構造に見合った各階層プレイヤーにおける役割の明確化とその実行が必須であった。しかし、この確実な実行では、高度成長期からの中心プレイヤーであった団塊世代から新世代への技術継承をはじめ、AIやIoTに代表される高度情報化の情報伝達のような内外環境変化による種々の課題が発生している。このような課題解決のためには、環境要因変化に順応した各階層間や階層内でのコミュニケーションの確保が最善手段である。

これらから、本章では、社会環境変化を見据えたマネジメントの安定運営のため、コミュニケーションのあり方とそのコミュニケーションにおける支援ツールについて、我が国における組織の構造や役割・機能から、組織イノベーションの発現可能な理論的具現像を

示すものである。

なお、本章の内容については、次のとおりである。はじめに、組織構成のあり方とその組織構成でのコミュニケーションの役割と内容を整理する。次に、組織イノベーションの発現メカニズムを踏まえたコミュニケーションのあり方を提案する。最後に、実効的なコミュニケーションに必要なコミュニケーションツールについて提案する。

第2節 組織構成とコミュニケーションの役割

2. 1 組織構成

一般に、企業組織の多くは、経営・管理・実務等多階層から成立している³⁾⁴⁾。アセットマネジメントシステムにおける組織構成も同様の多階層組織となっている。

本章では、一般の企業組織との比較を鮮明にするため、**図-4.1**のように経営層・管理層・実務層の3層構成とする。ここで、各階層における役割と業務サイクルについて定義する。

① 経営層

アセットマネジメントシステム全体の目的や基本方針等の内的意志決定と外的環境に対する成果等のアウトプット等の意志決定を中心とした経営サイクルである。

② 管理層

アセットの安定管理として現状把握から将来の状態予測やその補修更新までの計画策定等の執行管理サイクルと経営層における意志決定の基盤を構築するための経営支援サイクルである。

③ 実務層

アセットの状態把握のための点検診断やその結果のデータ管理をはじめデータ解析による将来の状態予測と補修更新の時期や内容の検討を行う実務執行サイクルである。

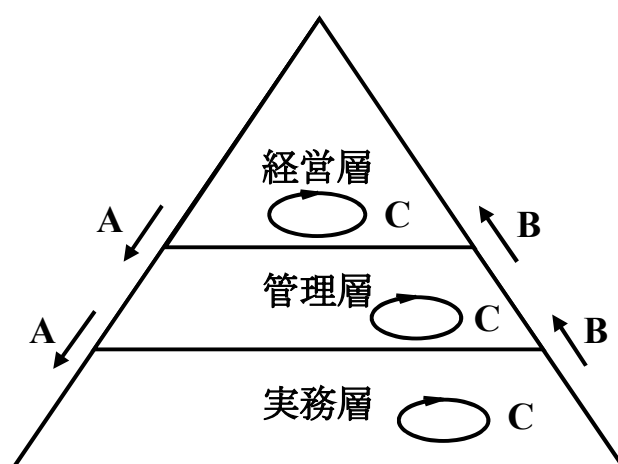


図-4.1 組織階層構成図

各階層間には、2種の業務フローがある。

第1のフローは、実施責任を下位層の責任者の実施サイクルのもとに委託する権限移譲の業務フローである。

第2のフローは、その権限移譲による下位層のサイクル活動結果を成果情報として上位層へ写像化される業務フローである。

これら2種の業務フローにより、多階層組織のアセットマネジメントシステムが形成されている。なお、実務層においては、下位層への権限移譲が発生しないことから業務サイクルを実際の現場への反映情報として認識することで業務サイクルの写像とするものである。このようにアセットマネジメントシステムにおけるコミュニケーションは、権限移譲での下位層の目標展開及び業務成果の上位層へのフィードバックによる階層間コミュニケーションと階層内での業務サイクルを実施展開するための階層内コミュニケーションにより成立している。

2. 2 コミュニケーションの内容

アセットマネジメントシステムにおけるコミュニケーションは、階層間と階層内のコミュニケーションに区分され、全体イメージを示すと図-4.2のとおりである。

次に、図-4.2に沿って、階層間と階層内に分類して各コミュニケーションの概要について解説する。

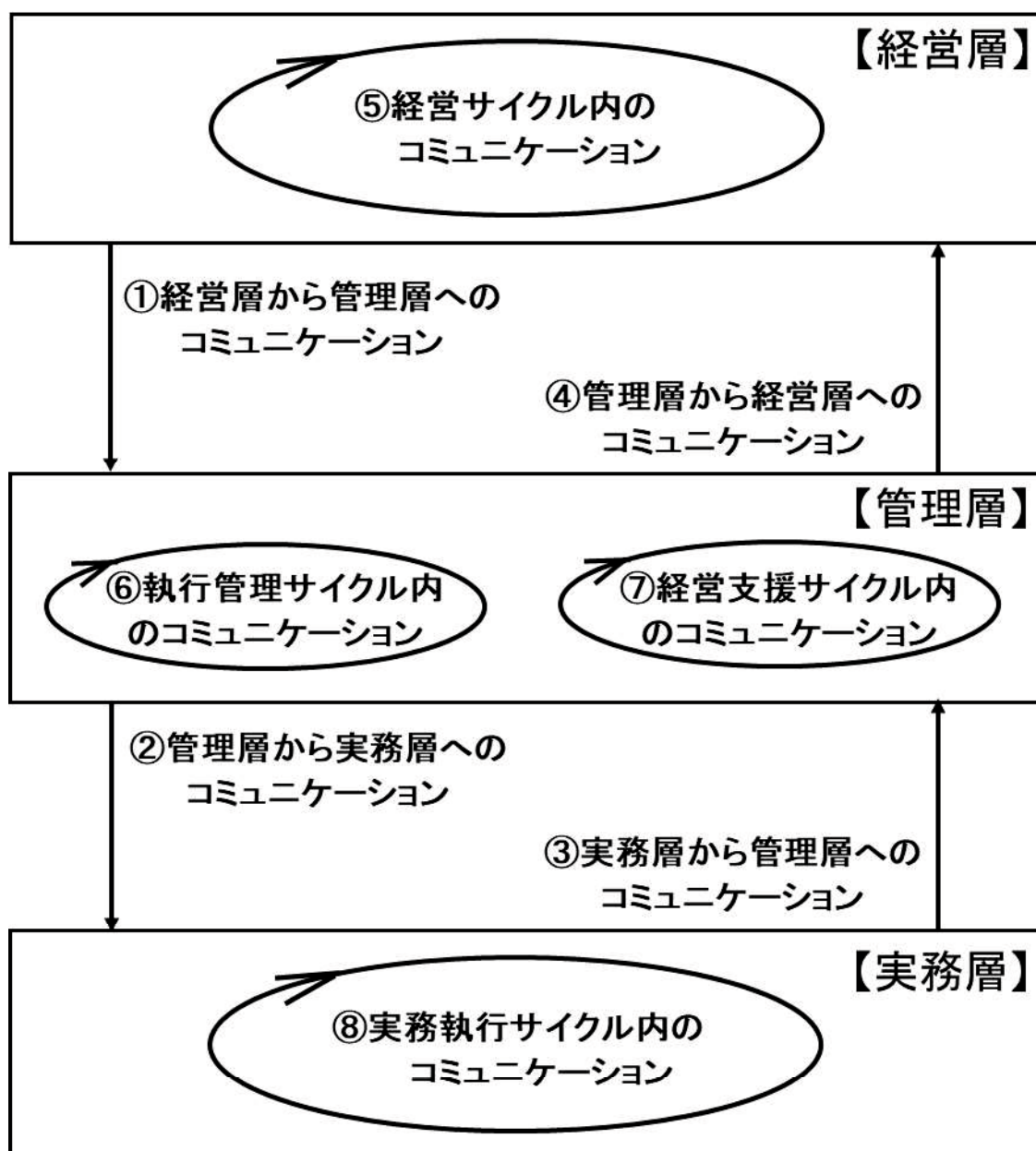


図-4.2 組織構成とコミュニケーションの関係図

◆ 上位層から下位層間によるコミュニケーション

① 経営層から管理層へのコミュニケーション

アセットマネジメントによるアセットのリスクや財務関係等の成果指標 (KGI: Key Goal Indicator) の共有とその具体となるアセットの健全性や経済性等の業績目標 (KPI: Key Performance Indicator) の設定等の伝達が基本である。

② 管理層から実務層へのコミュニケーション

管理層で設定した業務目標 (KPI) の共有とその具体となるアセットの現状把握から将来予測までの実務プロセス (PDCA) の確認及びアドバイス等が基本である。

◆ 下位層から上位層間によるコミュニケーション

③ 実務層から管理層へのコミュニケーション

業務目標 (KPI) に対する状況報告とその結果に対するアセットの現状把握の実施方法や将来予測手法等の実務プロセス (PDCA) の課題や改善提案に関する調整等が基本である。

④ 管理層から経営層へのコミュニケーション

アセットの健全性や経済性からの成果指標 (KGI) の状況報告と具体的な業績目標 (KPI) の詳細内容及び実務プロセス (PDCA) の課題から生じる業績目標 (KPI) に反映された課題改善状況の報告や成果指標 (KGI) に関連した経営的提案が基本である。

◆ 各階層内でのコミュニケーション

⑤ 経営層内でのコミュニケーション

成果指標 (KGI) の共有とアセットのリスクや財務関係等の外部環境へのアウトプット検討や業績目標 (KPI) の定期確認と課題解決のための経営組織の改変検討等が基本である。

⑥・⑦ 管理層内でのコミュニケーション

業務目標 (KPI) の共有やアセットの現状把握から将来予測までの実務プロセス (PDCA) の課題及び改善内容提案の共有とその実施における経済合理性を踏まえた検討が基本である。

⑧ 実務層内でのコミュニケーション

業務目標 (KPI) の共有とその具体的な実務プロセス (PDCA) の共有及びアセットの現状把握実施方法や将来予測手法等の実務プロセス (PDCA) に対する状態把握・課題発掘・改善検討が基本である。

このように階層間コミュニケーションは、上位階層から下位階層への命令型コミュニケーションと下位階層から上位階層への具申型コミュニケーションに再分類される。また、各階層内コミュニケーションは、階層内の関連組織等との伝達調整型コミュニケーションとなっている⁵⁾⁶⁾。

2. 3 コミュニケーションの重要性

一般に企業の組織構造が、階層型である場合には、伝達型の指揮命令コミュニケーションが効率的な組織運営を可能としてきた。しかし、社会の成熟化は、多様化へと変化し、企業組織におけるコミュニケーションも多様性や創造性を考慮したあり方の検討が必要となってきた。この状況は、アセットマネジメントの運営においても同様である。

少子高齢化社会の到来は、実務者減少や世代間コミュニケーション低下が課題である。また、AIやIoTに代表される情報化社会の進展は、実務作業のイノベーションに対する順応低下が課題である。これらの課題解決で、はじめに対応すべきものが、コミュニケーションの確保である。

組織におけるコミュニケーションは、組織内の情報基盤を形成するものであり、具体的には、実務プロセスにおける同期性を意味する⁷⁾。しかしながら、昨今の社会情勢を踏まえると、多様性がもたらす非同調性が実務プロセスの同期性の低下を招き、業務品質の低下に繋がっているのが実態である。その改善には、実務プロセスの同期性による実務上の最低ラインの情報基盤形成を図ることが必要となる。これが、情報共有化を目的としたコミュニケーションである。情報共有化は、情報の蓄積と共に進行することから、情報蓄積による情報共有の効率化が進展し、組織内の情報基盤のレベルの向上に反映される。更に、蓄積された情報を効率的に活用することで、新たな創造に繋がってくることを期待できるものである。この新たな創造が、イノベーションであり、情報基盤形成から発現される同調的な共鳴状態の創発的エネルギーである⁷⁾。

このように組織におけるコミュニケーションは、初期の情報共有化から情報蓄積と同時に進行し、その蓄積情報の活用によって、最終的に新たなイノベーションを発現するプロセスを経て、組織の活性化に貢献している⁸⁾。

第3節 組織におけるイノベーション発現のメカニズム

一般に、企業組織は、Tree型の階層構造であることから伝達型の指揮命令コミュニケーションが効率的な組織運営を可能としてきた。しかし、社会成熟度の上昇や社会的及び人間的な多様化社会への変化から、企業組織におけるコミュニケーションのあり方も多様性や創造性を焦点とした組織運営への見直しが必要となってきた。

このような状況は、アセットマネジメントの実務運営においても同様の現象として発生している。具体的には、少子高齢化での実務者減少により、点検作業における経験技術の消滅やデータ管理・解析作業における技術革新への不順応である。これらの課題解決手法で、はじめに対応すべきものが、イノベーションを発現可能とするコミュニケーションの見直し検討である。

まず、組織におけるイノベーションは、どの様にして発生するのか確認しておく必要がある。そのため、ここでは、組織におけるイノベーションの発生メカニズムを検討する。

イノベーションとは、システム論的には、経済学的な均衡モデルによる創発現象と定義される^{9),10)}。いま、階層型組織構造を制約条件としたシステムと考えた場合、上述の各階層間における命令型・具申型のコミュニケーションによる組織運営は、山下らの研究による経営品質管理モデル（MQSM: Management Quality Science Model）で位置づけることが可能である。MQSMとは、企業の効率性をエネルギー、多様性をエントロピーとして、統計物理学的モデルで経営品質をモデル化したものである。

このMQSMを用いると、各階層間における命令型・具申型のコミュニケーションによる組織運営は、低エネルギー・低エントロピータイプに位置付けられ、エンパワーメントや各メンバーによる活性化が期待できないものである⁹⁾⁻¹¹⁾。これは、当然のことながら、組織的にも創発現象は発生せず、イノベーションが期待できないものとなる。このため、この状態を改善し、各プレイヤーの活性化から組織的な創発現象を発生させて、イノベーションを起こさせる必要がある。これには、山下らのMQSMから考慮すると、現代の多様性社会に対応した高エントロピー状態へのシフトである。しかし、高エントロピー状態は、統計物理学でのゆらぎ状態であるため、とても不安定な状態である。そのため、ゆるやかでバランスのとれた外的な規則性や拘束性も不可欠となる¹⁰⁾。更に、企業効率性の観点では、MQSMの低エネルギーへのシフトも求められるため、低エネルギーと高エントロピーの調和状態の形成もイノベーション発現に重要である¹¹⁾⁻¹³⁾。

第4節 実効的なコミュニケーションの提案

本節では、アセットマネジメントにおけるイノベーションの発現可能なコミュニケーションについて提案する。組織のイノベーション発現には、各プレイヤーの活性化による創発現象が必要である。この創発現象の原点は、実務プロセスを執行する実務層のプレイヤーである。この実務層を焦点としたコミュニケーションは、次のとおりの内容と考える。

(1) 実務層から管理層へのコミュニケーション

はじめに具申型コミュニケーションから調整型コミュニケーションへの変改である。実務層のプレイヤーは、業務目標（KPI）に対する実務プロセス（PDCA）の課題やその改善提案について、管理層のプレイヤーに十分な理解と支援を形成させるための調整を目的としたコミュニケーションが必要となる。そして、管理層のプレイヤーは、実務層のプレイヤーが提案した改善に対して、経済合理性の観点を含め、補完や支援を目的としたアドバイスによる協働的な業務目標（KPI）の達成に向けた行動が必要である。

(2) 実務層内のコミュニケーション

実務層から管理層へのコミュニケーションが調整型へ変改することにより、実務層内のコミュニケーションの変改も必要である。現代のアセットマネジメントにおいては、実務層のプレイヤー不足や技術継承の不備が深刻化する傾向にある。このため、実務層のプレイヤーは、実務プロセス（PDCA）の確実な執行を重要視することから、課題の発掘や改善の検討において、従来手法に固執する傾向にある。このような従来思考から脱却した新規概念への発想の転換が可能となるコミュニケーションが求められている。例えば、アセットの劣化補修に際しては、従来の手法や材料に固執せず、新技術や新工法を導入した新たな補修方法の提案とその実現に向けた前進的なコミュニケーションが必要である。そして、実務プロセスを詳細に理解させるために、管理層のプレイヤーにも改善の提案がわかりやすい説明方法の工夫もあわせて必要である。

本節では、現代社会に対応したアセットマネジメントの安定運営のため、組織構造をシステム的に統計物理学的な MQSM を参考にしてイノベーションの可能性をコミュニケーションのあり方として表象化したものである。この他にもイノベーションを発現するアイテムは、当然のことながら存在するが、組織構成や各メンバーの役割を維持する制約条件のもとでは、最も実現可能なアイテムとして、コミュニケーションの変改に焦点を当てたものとした。

また、本来、イノベーションを発現可能とするコミュニケーションは、経営層まで含め

た組織全体のコミュニケーションとすべきである。ここでは、イノベーション発現の起因性とその実現の可能性を考慮して、実務層と管理層のコミュニケーションを中心に具現化した。しかし、実務層と管理層でのコミュニケーションに効果が発現された後には、経営層も含めたコミュニケーションについても内容を検討して実施する必要がある。そして、イノベーション発現のため、実務層と管理層のみならず経営層も含めた企業内コミュニケーション変革への意識改革も不可欠となる。

そのためには、マネジメント関係者となる各階層のプレイヤーが、効率的に同様の理解ができるコミュニケーションのツールが、必要不可欠である。そのツールとして、次節で解説する実務プロセスを反映したモデリングが必要である。

第5節 実効的なコミュニケーションツールの提案

本節では、アセットマネジメントにおけるイノベーションの発現可能なコミュニケーションを実現するためのツールについて提案する。この提案ツールは、実務プロセスにおけるモデリングを基本としたものを対象にしている。具体には、第3章で提案した狭義的マネジメントツールの本モデル（健全度予測モデルとその解析手法）である。

一般に、モデリングとは、モデルの構築や分析から現実世界を表現する手法である¹⁴⁾。そして、現代科学で用いられるモデルは、具象モデル、数理モデル、数値計算モデルのカテゴリーに大きく区分される。具象モデルとは、具体的事物からできており、現象を表現する可能性のあるものである。数理モデルとは、抽象構造で現象を数学的に表現する可能性のあるものである。数値計算モデルとは、手続きによってシステムをコンピューター上での数値計算として記述する可能性のあるものである¹⁴⁾。

本モデルは、狭義的マネジメントの実務プロセスである点検データから将来の健全度予測をはじめとした数理モデルに該当する。このような数理モデルは、資産状態変化である現象に対する表象として、マネジメント関係者が効率的に理解できるコミュニケーションを支援するものとなる。これらから、アセットマネジメントシステム（狭義的マネジメントと広義的マネジメントの双方）において、数理モデルは、実効的なコミュニケーションの支援ツールとなるものである。その理由と具体について、解説する。

一般に、社会システムとして取り扱う対象におけるコミュニケーションとは、伝達された情報の理解が必要である¹⁵⁾⁻¹⁷⁾。そして、この理解とは、差異による区分化の指示であると、ニクラス・ルーマンによって定義されている¹⁵⁾⁻¹⁷⁾。つまり、コミュニケーションとは、対象物の変化に対する差異の仕組みを明確にすることで、伝達される情報の理解ができることを意味している。これらを回帰的に繰り返し実行することで、コミュニケーションの行為の実現から創発へと転回できるのである。

このようなコミュニケーションの一般定義を踏まえて、まず、第3章の本モデルが、アセットマネジメントのコミュニケーション支援ツールとなる理由を、その機能や役割から具体的な活用事例を踏まえて解説する。次に、広義的マネジメントのコミュニケーションにおける実効的活用の具体内容を提案する。

第3章では、本モデルが、個々のトンネル照明設備の状態をミクロ的要素とし、その要素からなるトンネル単位を系としたマクロモデルであることを解説した。そして、この系の状態確率の動的変化は、トンネル照明設備の状態 i の初期状態確率 $P_i(0)$ と状態 i から状

態 j への遷移確率 $P_{i \rightarrow j}$ によって、マルコフ確率過程上でのマクロ的確率束の流入と流出の差分から決定されるマスター方程式を解法することで、トンネル単位でのトンネル照明設備の時間的な状態変動を決定したものであることをあわせて説明した。これらより、本モデルは、状態 i の初期状態確率 $P_i(0)$ と状態 i から状態 j への遷移確率 $P_{i \rightarrow j}$ を投入（インプット）すると、マスター方程式を解法してトンネル単位でのトンネル照明設備の時間的な状態を健全度で産出（アウトプット）する仕組み（プロセス）であることが理解できる。この時間的な状態変動を時間的差異とすると、本モデルは、ニクラス・ルーマンのコミュニケーション定義による差異（時間的差異）の仕組み（本モデルのプロセス）を明確にするものであると考えることができる。このように、本モデルは、コミュニケーションの一般定義を踏まえても、アセットマネジメントにおけるコミュニケーションの支援に貢献できることが明示されるものである。特に、本モデルは、現場の実態を把握している実務層関係者が中心となる狭義的マネジメントよりも、現場の実態から距離のある業務に携わる中間層や経営層の関係者を主体とした広義的マネジメントにおいて大きな効果を発現するものである。

次に、広義的マネジメントのコミュニケーションにおける本モデルの基本活用について、本モデルのアウトプットとなる図-3.8を用いて解説する。本モデルは、対象物の時間的な状態変動を健全度という数値指標で可視化して、時間的な健全度の差異をプロセスの理解を含めて明確化するものである。その表象として図示化された基本的なものが、図-3.8である。これは、広義的マネジメントに関係する経営層・中間層・実務層の全関係者が、健全度の時間変化を同一認識することが可能となるものである。しかし、経営層・中間層・実務層で認識からの感度には、大きな相違があることが十分に想定される。実態を把握している実務層では、早期の補修や更新の必要性を実感しているが、中間層は、補修方法や更新時期について、再確認・再検討をする必要性を求めることが想定できる。また、経営層は、健全度と安全性の関係を明確化し、補修や更新のコスト最適化について検討を求めることが想定される。このように、図-3.8を事例としても経営層・中間層・実務層での認識による感度には、各層の権限・責任・役割からの相違があることは明白である。しかし、これらの見解は、各層からの重要事項であるため、これらを調整して均衡を確保した合意形成をすることが、組織におけるマネジメントのコミュニケーションの核である。つまり、このような見解は、本モデルのアウトプットである図-3.8によって、発現されたものである。このようなコミュニケーションの実行は、広義的マネジメントの基本となるものであり、そのコミュニケーションの支援ツールとして、本モデルが大きく貢献していることが理解できるものである。

上記の広義的マネジメントでのコミュニケーションにおける本モデルの基本活用を踏まえて、実効的な活用内容を図-3.8, 図-3.9, 図-3.14 を事例として提案する。図-3.8, 図-3.9, 図-3.14 は、本モデルを用いたアウトプットとなる健全度の時間的推移を表示したものである。ここで、ニクラス・ルーマンのコミュニケーション定義に立ち返って考慮すると、伝達された情報の理解は、差異による区分化の指示であった。つまり、広義的マネジメントでの補修や更新における目的行為に対する区分化(補修更新をする・補修更新をしない)の差異を可視化して指示することが、コミュニケーションを回帰化させて活性化へと転回させるのである。具体的には、補修や更新の閾値設定の可視化が差異の区分化に相当するものである。第3章では、健全度の閾値を30(%)として検討をした。この閾値を、図-3.8, 図-3.9, 図-3.14 で可視化してみると、図-4.3, 図-4.4, 図-4.5 のようになる。

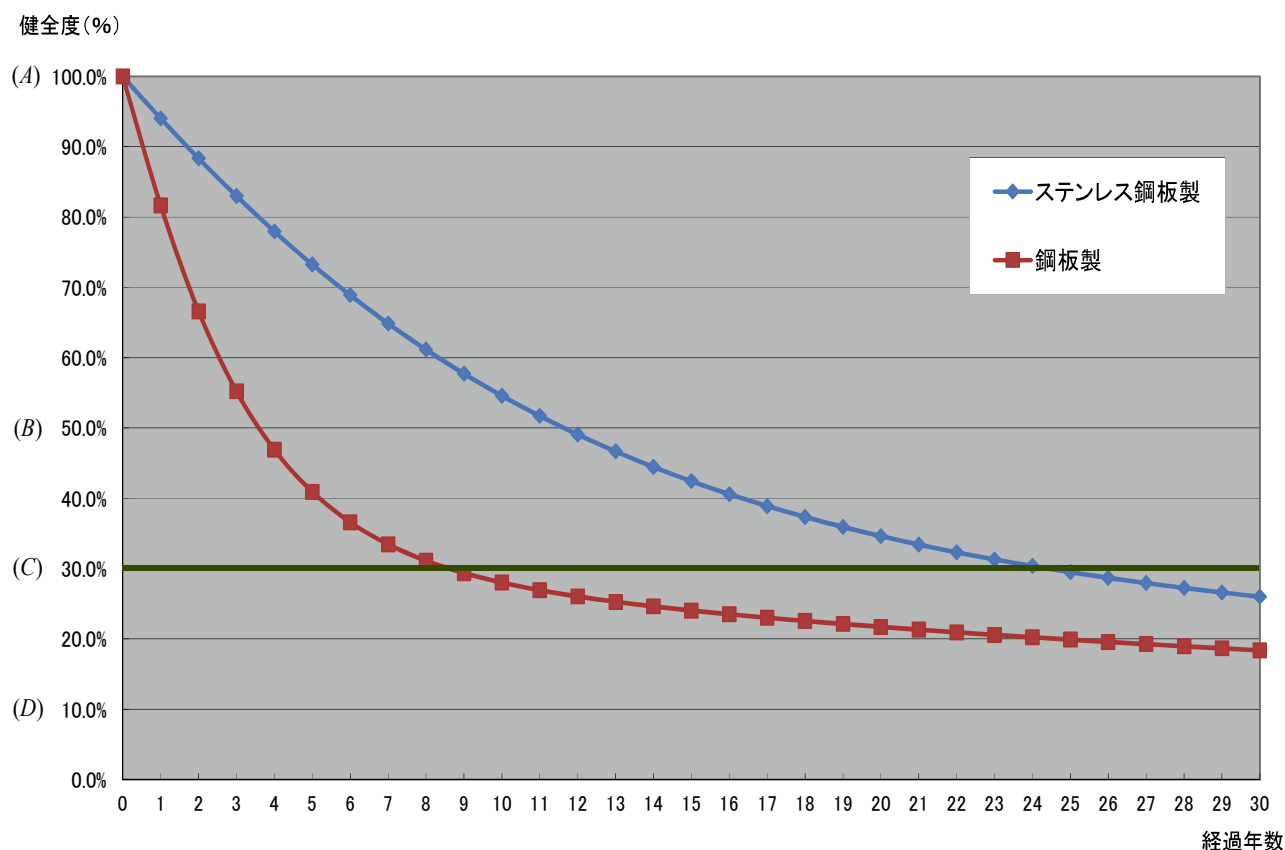


図-4.3 材質別予測健全度曲線図 (閾値あり)

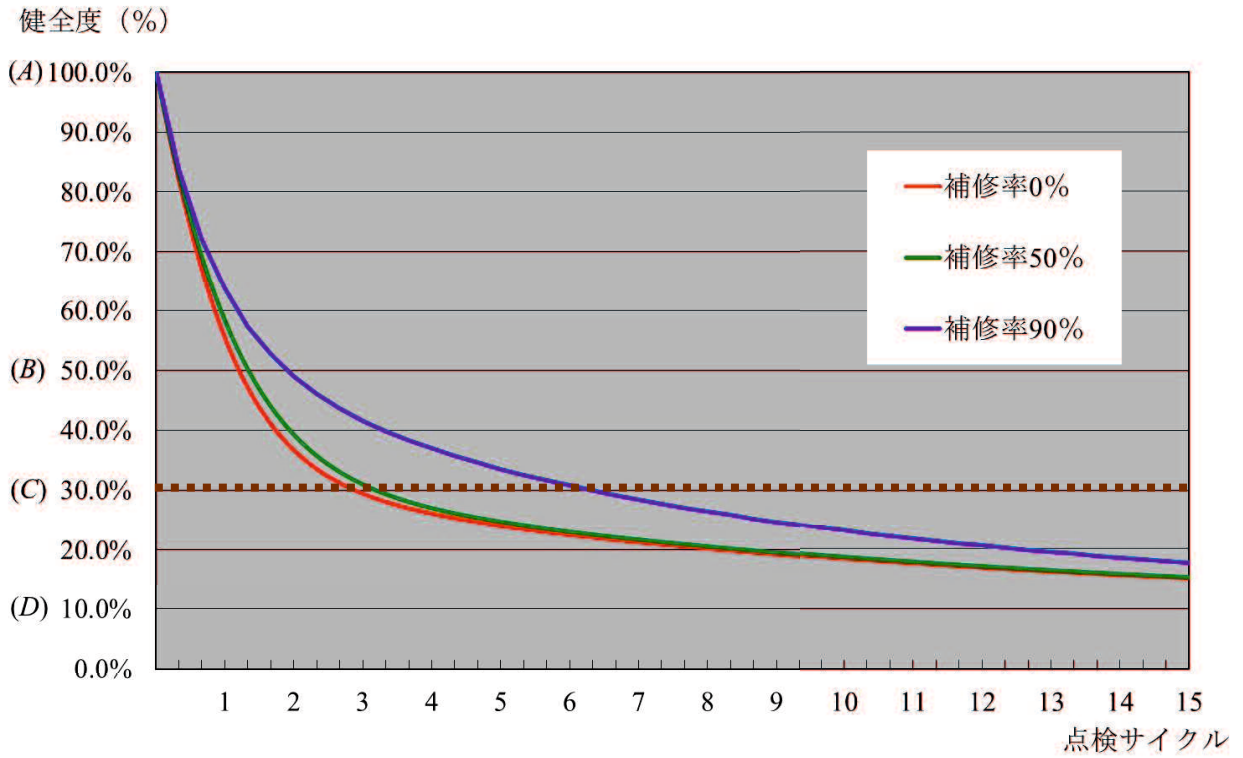


図-4.4 補修率別予測健全度（閾値あり）

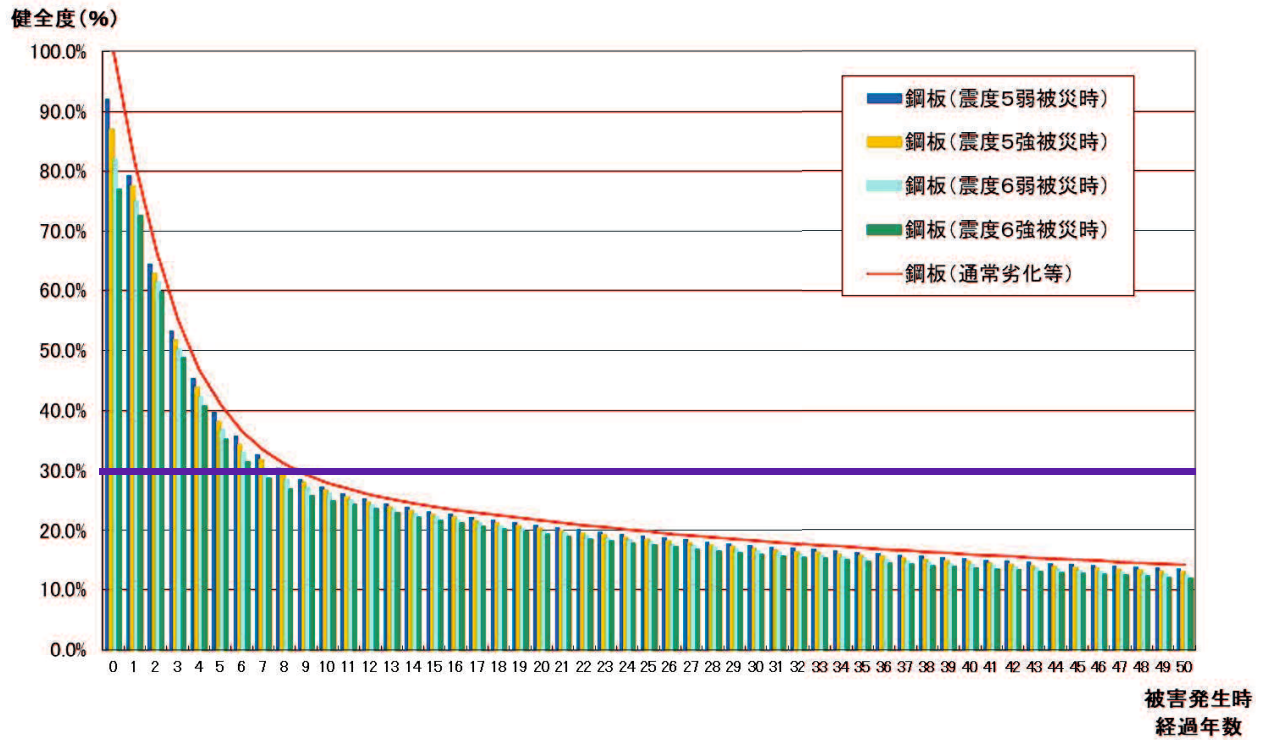


図-4.5 鋼板製震度別被害後健全度（閾値あり）

このように閾値を設定することで、**図-4.3**では、補修や更新の実施可否に対するコストパフォーマンスとして LCC 型マネジメントに発展したコミュニケーションが展開されて合理的な意思決定が期待できるものとなる。また、**図-4.4**では、最適な補修率の設定とあわせて、補修の実施時期の選択についても議論となることが想定される。これらの解決策としては、補修の実施時期を含めた最適補修率設定による LCC 型マネジメントの必要性を明確化するものとなっている。更に、**図-4.5**では、地震発生後の迅速な復旧における補修や更新の対象区分化やその優先度の意志決定に対するコミュニケーションに貢献することが期待できるものである。これらから、本モデルのアウトプットに対して、閾値のような差異区分化の加工は、広義的マネジメントにおけるコミュニケーションの活性化に繋がることを期待できるため、マネジメントの螺旋的な向上に寄与するものとなる。

一方で、このような閾値設定には、本モデルのインプットとなる点検データや関連データ（環境データ・履歴データ・諸元データ）の精度向上は、不可欠である。そのため、定期的なデータチェックとあわせて、詳細データによるデータベースの構築に向けた取り組みや詳細データでのモデル拡張についても議論されることが、広義的マネジメントの向上に貢献することになる。

これらから、本モデルは、広義的マネジメントにおけるコミュニケーションの支援ツールとして活用可能であることを解説したが、マネジメントの向上とあわせて、数理モデルも進化させることが必要となる。本モデルは、簡易的な数理モデルであるが、データ内容の詳細化に見合った数理モデルへと拡張していくことが重要である。

ここでは、このような視点で、数理モデルの特性を踏まえたコミュニケーションツールとしての実効性を検討する。数理モデルの特性は、現象対応の観点から、単純化表象と精緻化表象に区分する。これより、モデルの区分は、単純化表象を簡易モデル、精緻化表象を複雑モデルとする。上記前提を踏まえて、簡易モデルと複雑モデルを用いた組織のコミュニケーションにおける情報共有の適用性を比較する。

コミュニケーションの基礎である情報共有は、情報理解度から成り、単体の情報処理度とコミュニケーション相互間の情報伝達度に依存している。ここで、上記を数理表現するため、情報理解度 U (%)、単体依存度 P (%)、相互依存度 C (%) と設定すると、次式のとおりとなる。

$$U = P + C \quad (4.1)$$

まず、単体依存度は、単体の情報処理度 D (%) であり、単体保有の知識蓄積度 A (%) と情報処理意欲度 M (%) から成立する。

また、相互依存度は、相互間の支援度 H (%) であり、相互共有知識度 S (%) と伝達意欲度 T (%) から成立する。これにより、式(4.1)は、次式のとおりとなる。

$$U = P + C = D + H = A \cdot M + S \cdot T \quad (4.2)$$

次に、情報利得 G の算出にあたって、入力情報 I_{in} (%) と出力情報 I_{out} (%) は、基本情報 I (%) としたとき、次のとおりである。なお、 K_1 と K_2 は、係数である。

$$I_{in} = K_1 \cdot S \cdot T \cdot I \quad (4.3)$$

$$I_{out} = K_2 \cdot (A \cdot M + S \cdot T) \cdot I \quad (4.4)$$

これより、情報利得 G は、次のとおりである。ここで、 O は、定数項である。

$$\begin{aligned} G &= \ln \frac{I_{out}}{I_{in}} = \ln \frac{K_2 \cdot (A \cdot M + S \cdot T) \cdot I}{K_1 \cdot S \cdot T \cdot I} \\ &= \ln \left(\frac{A \cdot M}{S \cdot T} + 1 \right) + O \end{aligned} \quad (4.5)$$

上記は、単体の場合であるが、集合体である組織の全体情報利得 TG を考える。全体情報利得は、次のとおりとなる。

$$TG = \sum_i G_i = \sum_i \ln \left\{ \left(\frac{A_i \cdot M_i}{S_i \cdot T_i} + 1 \right) \right\} \quad (4.6)$$

この全体利得に対する平均値である平均全体情報利得 ATG は、次のとおりとなる。

$$\begin{aligned} ATG &= \sum_i I_{out} \cdot G_i = \sum_i I_{out} \cdot \ln \frac{I_{out}}{I_{in}} \\ &= \sum_i K_2 \cdot (A_i \cdot M_i + S_i \cdot T_i) \cdot I_i \cdot \ln \left(\frac{A_i \cdot M_i}{S_i \cdot T_i} + 1 \right) \end{aligned} \quad (4.7)$$

式(4.7)は、カルバック・ライブラー情報量に相当するもので、一般に相対エントロピーと呼ばれているものである。

ここで、簡易モデルと複雑モデルの相対エントロピーを比較し、モデルの使い分けについて、情報共有における適用性から比較検討する。モデルの難易性と関連するものは、相互関連事項は当然であるが、単体においては、潜在保有事項でなく、心的関連事項である。

これより、情報処理意欲度 M_i 、相互共有知識度 S_i 、相互伝達意欲度 T_i の3項目と情報難易度 I_i を対象とした。いま、簡易モデルの情報処理意欲度を Ms_i 、相互共有知識度を Ss_i 、相互伝達意欲度を Ts_i 、情報難易度を Is_i とし、複雑モデルの情報処理意欲度を Mc_i 、相互共有知識度を Sc_i 、相互伝達意欲度を Tc_i 、情報難易度を Ic_i とする。上記設定より、平均全体情報利得は、簡易モデル ATG_s と複雑モデル ATG_c で、次のとおりとなる。

$$ATG_s = \sum_i K_2 \cdot (A_i \cdot Ms_i + Ss_i \cdot Ts_i) \cdot Is_i \cdot \ln \left(\frac{A_i \cdot Ms_i}{Ss_i \cdot Ts_i} + 1 \right) \quad (4.8)$$

$$ATG_c = \sum_i K_2 \cdot (A_i \cdot Mc_i + Sc_i \cdot Tc_i) \cdot Ic_i \cdot \ln \left(\frac{A_i \cdot Mc_i}{Sc_i \cdot Tc_i} + 1 \right) \quad (4.9)$$

これより、式(4.8)と式(4.9)の差分を比較すると、次式のとおりとなる。

$$\begin{aligned} & ATG_s - ATG_c \\ &= K_2 \sum_i \left[Ss_i \cdot Ts_i \cdot Is_i \left(\frac{A_i \cdot Ms_i}{Ss_i \cdot Ts_i} + 1 \right) \cdot \left\{ \ln \left(\frac{A_i \cdot Ms_i}{Ss_i \cdot Ts_i} + 1 \right) \right\} \right] \\ & \quad - K_2 \sum_i \left[Sc_i \cdot Tc_i \cdot Ic_i \left(\frac{A_i \cdot Mc_i}{Sc_i \cdot Tc_i} + 1 \right) \cdot \left\{ \ln \left(\frac{A_i \cdot Mc_i}{Sc_i \cdot Tc_i} + 1 \right) \right\} \right] \end{aligned} \quad (4.10)$$

ここで、テーラー展開を用いて式(4.10)を求めると、次式のとおりとなる。

$$ATG_s - ATG_c \cong K_2 \sum_i A_i \cdot (Ms_i \cdot Is_i - Mc_i \cdot Ic_i) \quad (4.11)$$

上式を条件別に考慮すると、組織の初期段階における条件では、単体の情報処理意欲度が低いことから、簡易モデルの方が複雑モデルより取り扱いが簡便でなので高くなるため、次式のとおりである。

$$Ms_i > Mc_i, Ic_i > Is_i, Sc_i > Ss_i, Tc_i > Ts_i \quad (4.12)$$

よって、結果は次式のとおりとなる。

$$M_i > S_i \cdot T_i \quad ATG_s > ATG_c \quad (4.13)$$

この結果は、組織的に相互共有知識量や相互伝達意欲が単体の情報処理意欲度より低いような組織においては、簡易モデルをツールとした方が情報伝達の確保ができ、損失が少なく情報共有できることを示している。

次に、簡易モデルによる学習が進み、単体の情報処理意欲度が高くなった場合の条件を考慮すると、簡易モデルに対する慣れから複雑モデルに対する情報処理意欲度が高くなるため、次のとおりである。

$$Mc_i \geq Ms_i, Ic_i \geq Is_i, Sc_i \geq Ss_i, Tc_i \geq Ts_i \quad (4.14)$$

よって、結果は次式のとおりとなる。

$$M_i \leq S_i \cdot T_i \quad ATG_s \leq ATG_c \quad (4.15)$$

この結果は、相互共有知識度や相互伝達意欲度が単体の情報処理意欲度を上回った段階にある組織においては、複雑モデルをツールとすることで高い情報伝達の確保と情報共有化が図れることを示している。

このように、単体の情報処理度や組織的な情報処理度が低いような初期段階の組織では、簡易モデルをツールとした教育的な活用によって、情報の蓄積が可能となり、組織的な成長が期待できると考慮される。そして、単体の学習が進み、情報処理度が高くなるにつれて、組織的な情報処理度も高くなる。このような成長段階の組織では、複雑モデルをツールとしたコミュニケーションにより、情報共有化が更に効率的となって、その情報の蓄積による活用でイノベーション発生の可能性が高まる。また、簡易モデルと複雑モデルとのコミュニケーションツールとしての適用転換の臨界点は、相互共有知識度と相互伝達意欲度の相乗が単体の情報処理意欲度と同等になる場合である。

これらを踏まえると、広義的マネジメントと狭義的マネジメントの双方におけるイノベーション発現を可能とするコミュニケーションツールは、初期段階では、本モデルのような簡易モデルを適用し、成長段階では、本モデルを拡張した複雑モデルに適用転換することが必要であることが理論的に理解できるものである。

第6節 まとめ

本章では、第2章第3節3.2 広義的マネジメント課題対応の具体手法として、広義的マネジメントにおけるコミュニケーションのあり方とそのコミュニケーションを支援するツールの理論的具現像を提案したものである。

提案に際しては、現代社会が保有する課題に対応可能なマネジメント運営を踏まえて、組織構造をシステムとして取り扱い、統計物理学的な考え方による経営品質管理モデルを参考にイノベーションの可能性に焦点をあてて検討した。その際、マネジメントの実務プロセスを企業組織の各層（実務層・管理層・経営層）の視点からも相違なく実態把握し、課題共有が期待できる実効的なコミュニケーションの具現像を明示した。

また、情報共有を効率化するコミュニケーションの支援ツールとしては、社会システムにおけるコミュニケーション定義から実務プロセスを反映した数理モデリングであることを明示した。その際には、第3章で提案した本モデルを用いて、その機能や役割から広義的マネジメントのコミュニケーション支援ツールとなる理由を具体事例で解説した。更に、広義的マネジメントのコミュニケーションにおける実効的な活用内容を提案した。

この提案に際しては、組織の成長度を踏まえたモデル適用性（簡易モデル・複雑モデルの適用性）の比較検討をした。その結果では、組織成長度から簡易モデルと複雑モデルを適切に使い分けることで、コミュニケーションの実効性とイノベーションの発現性に貢献できることを理論的に明示した。これによって、マネジメントの定着段階までは、本モデルをコミュニケーションツールで適用することの妥当性を明確化した。あわせて、成長段階に到達した際には、モデル拡張の必要性についても示唆した。

本章の提案は、イノベーション発現のアイテムとして、他アイテムの存在も認知した上、現状の組織構成や各プレイヤーの役割を維持する制約条件で、実現可能性を重視したものとなっている。しかしながら、企業組織全体のイノベーション発現には、経営層まで含めた組織全体での実効的なコミュニケーションやコミュニケーションツールの活用が不可欠である。そのためには、本章の提案内容に対する組織全体での検証とその検証結果を踏まえた組織全体の実効的なコミュニケーションやそのツールに対する理想像追及とそのため意識改革が不可欠である。

最後に、本章は、マネジメント論における経営品質の観点から理論的具現像として提案している。このようなマネジメント論では、過去のマネジメント論史からも種々の理論が提唱・提案されて、マネジメント・セオリー・ジャングルと呼ばれた経緯も窺えるもので

ある^{18), 19)}.

つまり、多種多様な理論から組織体質（環境・資産・機会・リスク）に相応論を選択して、組織的実践をすることが、マネジメントとしての価値を発生させるのである。そして、その実践は、真正的マネジメントであり、その実践結果は、マネジメント理論としての真価や変改へと進化させるものであることを追記しておくこととする^{18), 19)}。

参考文献

- 1) 沼上幹, 軽部大, 加藤俊彦, 田中一弘, 島本実: 組織の<重さ>, 日本経済新聞出版社, 2007.
- 2) 土木学会編: アセットマネジメント導入への挑戦, 技報堂出版, 2005.
- 3) 河崎健司: マネジメントのシステム思考, 日本生産管理学会論文誌, Vol.14, No.2, pp.55-60, 2008.
- 4) 大澤幸生: 知識マネジメント, オーム社, 2003.
- 5) 河崎健司: コミュニケーションのシステム思考, 日本生産管理学会論文誌, Vol.15, No.2, pp.149-154, 2009.
- 6) 正村俊之: コミュニケーションによる自己組織化, 社会学評論, Vol. 249, No.2, pp.121-136, 1989.
- 7) 中根雅夫: 情報共有化に関する一考察, 国士舘大学経営学会経営論叢, Vol. 3, No. 2, pp.29-52, 2014.
- 8) 武市祥司: ものづくりにおけるナレッジ・マネジメント, 溶接学会誌, Vol. 77, No. 1, pp.55-59, 2008.
- 9) 高尾義明: ルーマンの社会システム論の企業組織論への導入の可能性, 社会・経済システム, Vol.17, pp.35-39, 1998.
- 10) 牧野丹奈子: 経営の自己組織化論, 日本評論社, 2002.
- 11) 山下洋史: 経営品質科学の研究, 中央経済社, 2011.
- 12) 山下洋史: 企業活動における低エネルギーと高エントロピーの調和モデル, 明大商学論叢, Vol.92, No.3, pp.17-30, 2010.
- 13) 金子勝一, 鄭年皓, 山下洋史: 企業のサステナビリティ要因としての低エネルギーと高エントロピーの調和, 第6回横幹連合コンファレンス予稿集, pp.331-334, 2015.
- 14) マイケル・ワイスバーグ: 科学とモデル, 名古屋大学出版会, 2017.
- 15) ゲオルク・クニール, アルミン・ナセヒ (館野受男, 池田貞夫, 野崎和義訳): ルーマン社会システム理論, 新泉社, 1995.
- 16) クラウディオ・バラルディ, ジャンカルロ・コルシ, エレーナ・エスポジト (土方透, 庄司信, 毛利康俊訳): GLU ニクラス・ルーマン社会システム理論用語集, 国文社, 2013.

- 17) 赤堀三郎：社会学的システム理論の軌跡ーソシオサイバネテックスとニクラス・ルーマンー，春風社，2021.
- 18) 喬晋建：＜研究ノート＞経営理論のジャングルークーンツ&オドンネルの所説を中心にー，熊本学園大学紀要論文産業経営研究，Vol.32，No.1，pp.131-144，2013.
- 19) 幸田浩文：経営管理思想にみる研究アプローチの多様性（1）ーバーリ＝クンダの管理イデオロギー波動論を中心としてー，東洋大学紀要論文経営論集，Vol.53，No.1，pp.129-143，2001.

第5章

アセットマネジメント の新展開への提案

第5章 アセットマネジメントの新展開への提案

第1節 提案概要

第2章では、アセットマネジメントにおける狭義的マネジメントと広義的マネジメントの機能と役割を概説し、その内容を踏まえた課題抽出をした。そこで、狭義的マネジメントでは、その成果（アウトプット）となる解析結果データが重要ツールとなり、マネジメントの中心的役割を担っていることを説明した。また、広義的マネジメントでは、アセットマネジメント全体の方針や目的を内外環境変化に対応させて価値を見出すため、組織構成やその組織要員のコミュニケーションが重要であり、そのコミュニケーションツールとなるものが狭義的マネジメントの解析結果データであることを説明した。

第3章では、狭義的マネジメントの課題に対応する具体策として、マネジメントの重要ツールとして本モデルを提案した。提案に際しては、本モデルの詳細解説から健全度解析や最適補修への適用事例を示すことで、本モデルの妥当性を検証した。また、リスクマネジメントとアセットマネジメントを結合したマネジメントにも本モデルの有用性を示すことで、課題解決の重要ツールとして実用性が期待されることを明示した。

第4章では、広義的マネジメントの課題に対応する具体策として、組織構成と構成要員の役割と機能を解説し、その機能を前提とした組織的イノベーションの発現メカニズムからのコミュニケーションのあり方とそのコミュニケーションツールとしての本モデルにおける表象変化（簡易化・拡張化）を提案した。

このように、現状のアセットマネジメントの定着や品質向上における課題や対応策は、マネジメントの実践とフィードバックによるPDCAサイクルによって、少しずつ進化している状況である。しかしながら、今後の社会経済状況を踏まえると、少子高齢化や高度情報化により、人的対応の減少による機械的対応への転換が加速化することが想定される。

本章では、このように想定される将来の状況においても、従来のマネジメントから乖離することなく、ソフトランディングが可能なアセットマネジメントのあり方を提案するものとする。

なお、提案にあたっては、従来のアセットマネジメントを前提に、第3章と第4章の提案内容を将来対応型のマネジメントへの円滑なシフトに向けた理論的展開をする。

第2節 将来対応型マネジメントの概要

第2章では、アセットマネジメントの体系や仕組みから、狭義的マネジメントと広義的マネジメントが相互作用を及ぼしながら全体マネジメント形成と累積的進化するものであることを記載した。そして、狭義的マネジメントと広義的マネジメントの関連は、マネジメント運営者間におけるコミュニケーションが基本であることも記載した。これらの内容は、マネジメント原理に相当するものであるため、コミュニケーションスタイルは時代変化すると想定できるが、体系や仕組みにおける大きな変化は想定不可能と推定される。

そこで、従来のアセットマネジメントの体系や仕組みを前提として、少子高齢化による狭義的マネジメントの点検・補修・データ管理・データ解析の熟練技術者の削減や高度情報化によるAIやIoTの発展を中心に、技術的・社会的対応が可能となるマネジメント像について検討する。

狭義的マネジメントは、PDCAサイクルを中心に技術進化と共存してきたものである。このため、少子高齢化による熟練技術者の削減や高度情報化の発展に直接的影響を受けるマネジメントである。一方、広義的マネジメントは、マネジメント効率性追求を中心に成果と共存してきたものである。このため、少子高齢化による熟練技術者の減少や高度情報化の発展に対しては、間接的影響を受けるマネジメントである。これらを踏まえて検討すると、狭義的マネジメントの直接的影響に対して、広義的マネジメントでのマネジメント対応の機能強化が、将来型マネジメントにおける重要点であることが理解できる。つまり、狭義的マネジメントでの点検・補修・データ管理・データ解析の各作業熟練者の欠如とAIやIoTをはじめとした高度情報技術の導入に対して、広義的マネジメントの基本となる組織の構成・役割分担・コミュニケーション（連携・情報共有）による機能強化によって克服するマネジメントスタイルである。このような環境変化には、スムーズな対応が必要となるため、環境変化を的確に監視して、迅速な対応をすることが重要である。そのためにも第4章で提案した組織コミュニケーションやコミュニケーションツールの活用は、上記の重要性を保持していることが理解できる。

このように、将来環境に対応したアセットマネジメントとは、従来のアセットマネジメントのマネジメント対応力における機能強化に他ならないのである。しかし、従来と大きく異なる点は、機械技術から最大支援化と機械技術との最適共存が基本となることである。つまり、狭義的マネジメントにおける熟練者欠如に対する機械技術支援を最大化する役割分担や機能分担を考慮し、熟練者欠如の補完以上の成果を発現する機械技術との調和マネ

マネジメントの形成にある。このためには、マネジメント対応力に人間中心主義を基本としたマネジメント思想形成が必要である。

次節以降では、狭義的マネジメントと広義的マネジメントの視点から、本論文の対象となるトンネル照明設備を事例とした調和マネジメントの具現像を記載する。

第3節 狭義的視点からの将来マネジメント像

一般に、狭義的マネジメントは、PDCA サイクルの各段階において、その専門技術の進化と共存してきたものである。特に、技術進化の直接的影響を受けやすい段階は、実務作業を主体とする実行段階である。第2章で記載したとおり実行段階は、実施・管理・予測に作業区分される。実施作業は、点検やモニタリングによる状態把握、管理作業は、各種データ管理、予測作業は、管理データによる解析である。これらの作業は、専門技術の進化が著しいため、その進化内容を踏まえたマネジメントの検討が必要である。本節では、狭義的マネジメントの実行段階を中心に、トンネル照明設備を想定事例としたマネジメント将来像について検討する。

(1) 実施作業

従来のトンネル照明設備の構造的な状態把握は、第3章で記載のとおり熟練点検者による定期点検（目視・触手・打音）を実施している。今後、定期点検での状態把握機能を保有した高感度カメラと画像処理によるモニタリング技術が支援適用された場合には、定期点検との状態把握における機能分担をする必要がある。具体には、定期点検とモニタリング技術の長所と短所を明確にした機能分担をすることである。定期点検は、劣化や損傷による落下等の最大リスクを確認できる長所があるが、補修等が必要のない経過観察状態の劣化状況の把握や分類には、限界がある。一方、モニタリング技術は、画像処理技術により軽微な劣化状態の把握が可能であるが、灯具部の背面状態、灯具部・取付部・アンカー部の腐食状態、アンカー部のボルト状態等の目視の注意箇所や触手・打音での確認箇所の把握には、閉所用小型高感度カメラや他センサーとの複合技術がないと限界がある。このような長所・短所を踏まえた機能分担としては、低リスクの軽微な状態把握にモニタリング技術を中心とし、高リスクとなる重点箇所の状態把握を定期点検で実施することで、定期点検とモニタリング技術との機能補完による共存が可能になる。また、モニタリング技術の進化にあわせて、定期点検での状態把握機能の領域との整合評価をして、技術適用性を判断することが基本となる。その適用内容からの機能再分担は、高リスク箇所の状態把握を定期点検からモニタリング技術へのシフトによる領域の拡大に繋がり、無理なく相互共存しながら機械化支援から機械化転換に対応したマネジメント改変をすることが可能となる。このルーチンを技術進化にあわせて、繰り返し実施しながら機械化転換に対するマネジメント形成ができるのである。

(2) 管理作業

第2章で管理データとしては、環境データ（点検等の時間や場所）、履歴データ（点検や補修の結果や実績）、諸元データ（設置年月や構造材質等）が不可欠であり、データベースシステムとして形成するべきであることを記載した。IoTをはじめとした情報技術の進化により、データベースシステムは、汎用化への刷新が著しくなっていくことが想定される。しかし、一般的に社会基盤施設の維持管理は、長期間に及ぶため、システムは陳腐化しても、管理データの陳腐化は許されない。そのため、システム改変にあたっては、過去の管理データ保存確保と活用可能なシステム形成が重要となる。また、状態把握がモニタリング技術にシフトされるにつれて、データ量やデータ内容が変化するため、定期点検データとのデータ内容の整合とその整合化からの結合フォーマットの形成が必要となる。トンネル照明設備で想定した場合には、定期点検の各部位とモニタリング技術の画像範囲の整合による過去の定期点検データとモニタリングデータのデータ連結が可能となって、過去データの活用性が継続されるのである。また、灯具部の背面状態・各部位の腐食状態・アンカー部状態の高リスク箇所定期点検結果とモニタリング技術の画像処理結果をデータ解析の視点を踏まえた結合フォーマットに形成することも重要である。これらは、データ解析における解析モデルの拡張化をはじめとした精度向上に繋がることを期待できる。

(3) 予測作業

第2章で劣化解析のような解析モデルや解析手法は、マネジメントにおける情報認識や情報共有の重要ツールであることを記載した。あわせて、第3章では、トンネル照明設備における健全度算出等のマネジメントに適用可能な本モデルを提案した。今後、状態把握やデータ管理において、技術進化した場合には、データ内容に見合ったモデル拡張が必要となる。モニタリング技術へのシフトは、データの離散化から連続化へのモデル対応が必要となる。これは、本モデルで遷移確率における時間発展の拡張化で対応することが可能である。また、モニタリング技術によって、定期点検での同一判定結果（ $A \cdot B \cdot C \cdot D$ ）における状態の区分化を可能としたモデル拡張が必要となる。これは、本モデルで量子論を導入することで、マスター方程式を量子マスター方程式による拡張化で対応することが可能である。しかし、量子論導入による拡張化は、量子理論の基本説明を必要とするため、本論文の範囲を超越していること、また、本論文の主目的が、本モデルの拡張化ではないことから、上記に留めることとする。そのため、本モデルの拡張化としては、遷移確率における時間発展的拡張について、具体内容を記載する。

状態 i の状態確率 $P_i(t)$, 状態 j の状態確率 $P_j(t)$, 状態 i から j への遷移確率 $P_{i \rightarrow j}(t)$ から, 式(3.4)から各状態確率 $P_i(t)$, ($i=A, B, C, D$) のマスター方程式は, 次のとおりである.

$$\frac{dP_A(t)}{dt} = -P_A(t) \cdot P_{A \rightarrow B}(t) \quad (5.1)$$

$$\frac{dP_B(t)}{dt} = P_A(t) \cdot P_{A \rightarrow B}(t) - P_B(t) \cdot P_{B \rightarrow C}(t) \quad (5.2)$$

$$\frac{dP_C(t)}{dt} = P_B(t) \cdot P_{B \rightarrow C}(t) - P_C(t) \cdot P_{C \rightarrow D}(t) \quad (5.3)$$

$$\frac{dP_D(t)}{dt} = P_C(t) \cdot P_{C \rightarrow D}(t) \quad (5.4)$$

上記の式(5.1)から式(5.4)を解法した各状態確率 $P_i(t)$, ($i=A, B, C, D$) は, 次式となる.

$$P_A(t) = P_A(0) \cdot \exp \left\{ - \int_0^t P_{A \rightarrow B}(t) dt \right\} \quad (5.5)$$

$$P_B(t) = \left[\int_0^t \left[P_A(0) \cdot P_{A \rightarrow B}(t) \cdot \exp \left[- \int_0^t \{ P_{A \rightarrow B}(t) - P_{B \rightarrow C}(t) \} dt \right] \right] dt + P_B(0) \right] \cdot \exp \left\{ - \int_0^t P_{B \rightarrow C}(t) dt \right\} = F_B(t) \cdot \exp \left\{ - \int_0^t P_{B \rightarrow C}(t) dt \right\} \quad (5.6)$$

$$P_C(t) = \left[\int_0^t \left[F_B(t) \cdot P_{B \rightarrow C}(t) \cdot \exp \left[- \int_0^t \{ P_{B \rightarrow C}(t) - P_{C \rightarrow D}(t) \} dt \right] \right] dt + P_C(0) \right] \cdot \exp \left\{ - \int_0^t P_{C \rightarrow D}(t) dt \right\} = F_C(t) \cdot \exp \left\{ - \int_0^t P_{C \rightarrow D}(t) dt \right\} \quad (5.7)$$

$$P_D(t) = 1 - P_A(0) \cdot \exp \left\{ - \int_0^t P_{A \rightarrow B}(t) dt \right\} - F_B(t) \cdot \exp \left\{ - \int_0^t P_{B \rightarrow C}(t) dt \right\} - F_C(t) \cdot \exp \left\{ - \int_0^t P_{C \rightarrow D}(t) dt \right\} \quad (5.8)$$

上記から, 本モデルでは, モニタリング技術進化に対応した解析モデルの拡張化が可能であることを理論的に示すことができた. 一般に, 解析モデルでは, 解析データが収集技術の進化や革新によって, データ量やデータ内容が変化することで, 解析モデルの変更対応をせざるを得なくなることは多く見られる. そのような状況に対しても, 本モデルでは,

解析プロセスの本質を変更することなくデータの変化に対応することが可能である。これは、本モデルが、従来までの重要ツールとしての活用内容を変化することなく、解析結果の精度向上に繋がるものと期待できる。そのためにも、本モデルの拡張化をした際は、収集データによるモデル検証をして、拡張モデルに対するブラッシュアップを図っていくことが必要である。

このように、狭義的マネジメントは、専門技術進化の影響を受けやすいため、技術進化の状況を十分に把握し、適用性検討とその適用に見合ったマネジメント将来像を検討しておく必要がある。そして、この狭義的マネジメントでの検討は、広義的マネジメントにおける技術進化に相応した人と機械との調和マネジメント形成を可能にする基礎となるものである。

第4節 広義的視点からの将来マネジメント像

第2章で記載したとおり、広義的マネジメントは、マネジメント効率性追求によって、経営的成果をマネジメントの反映としてきたものである。そのため、技術進化の直接的影響を受ける狭義的マネジメントとは異なり、経営成果であるアウトプットによって間接的影響を受けることになる。しかし、広義マネジメントでは、狭義的マネジメントのような実務レベルでの内的影響ではなく、経営レベルの内外的影響となるため、影響度が大きく、影響認知にも時間を要するものである。このため、広義的マネジメントは、狭義的マネジメントの変化を迅速に把握するための機能強化が必要となる。この機能強化とは、組織の構成・役割分担・コミュニケーション（連携・情報共有）における環境相応性の強化である。本節では、技術進化に対する広義的マネジメントの機能強化からのマネジメント将来像について検討する。なお、検討に際しては、第4章でも記載したとおりマネジメント論の特性上から理論的具現像となるが、具体可能部については、トンネル照明設備を想定事例とした概説を付記するものとする。

広義的マネジメントの機能強化は、経営組織が対象であり、大きく構成と構成体に区分することができる。構成強化とは、組織構成の強化とその役割分担の強化である。また、構成体強化とは、組織構成要員のコミュニケーション強化である。

(1) 組織構成の強化

第4章で広義的マネジメントの組織構成は、階層型であることを記載した。また、この階層型の組織構成におけるコミュニケーション内容についても記載した。このように、階層型の組織は、状況変化に対する意志決定や情報共有に時間を要する傾向がある¹⁾。しかし、アセットマネジメントは、社会基盤施設を管理するため、社会的使命や責任の重要性が高く、長期的活動であることから、組織全体での意志決定が必要である²⁾。このような課題や特性を踏まえ、各階層の状況変化の情報共有やその変化に対応した意志決定を迅速にする準フォーマル組織の形成が必要となる。この準フォーマル組織とは、インフォーマル組織のような個人的な人間関係から成る集団ではなく、フォーマル組織のように業務目的を共有した上で、緩い繋がりから成る集団と定義する³⁾⁻⁵⁾。準フォーマル組織は、無階層なフラット構造である。このコミュニケーションは、集団内を横断的に情報伝達するため、情報共有や意志決定の迅速化が期待できる³⁾⁻⁵⁾。また、業務目的を共有することで、フォーマル組織における意志決定支援に有効となることが期待できる。フォーマル組織と準フォーマル組織の関係を図-5.1に示す。また、マネジメント体系は、図-5.2に示すとおりであ

る。準フォーマル組織のマネジメントは、広義的・狭義的の双方を含む総合的マネジメントである。そして、フォーマル組織と連携（ハイブリッド化）する場合には、メゾループ（中間ループ）となり、広義的サイクル（マクロループ）と狭義的サイクル（ミクロループ）の双方と相互作用をする構造となっている。この特性を踏まえて、フォーマル組織と準フォーマル組織のハイブリッド化は、組織全体における縦断連携となり、組織構成の強化に繋がることが期待できる³⁾⁵⁾。但し、準フォーマル組織は、自主性や活動性を重視することから、知識や意識における条件や規制の保有化がマネジメント価値に反映するため、マネジメントの成熟段階での集団形成が機能を最適化させるものとなる。そのため、運営組織は、現時におけるマネジメント状況を正確に把握し、準フォーマル組織の取り扱いを見極めた組織改変をすることが重要である。

(2) 役割分担の強化

環境変化の象徴である技術進化は、狭義的マネジメントの点検・データ管理・データ解析における実務作業の人的領域を機械的領域へと変化をさせる。そして、この変化は、マネジメントの意志決定における迅速化や精緻化への人的投資に繋がることが想定される。この前提から、準フォーマル組織の役割は、環境変化対応型マネジメントへの意志決定支援となる。具体には、環境対応型マネジメントに向けた改善発掘とその構想提案である。これは、環境変化の把握や予測から、将来マネジメントへ向けた高度改善であり、従来マネジメントの改善と相違なものである。

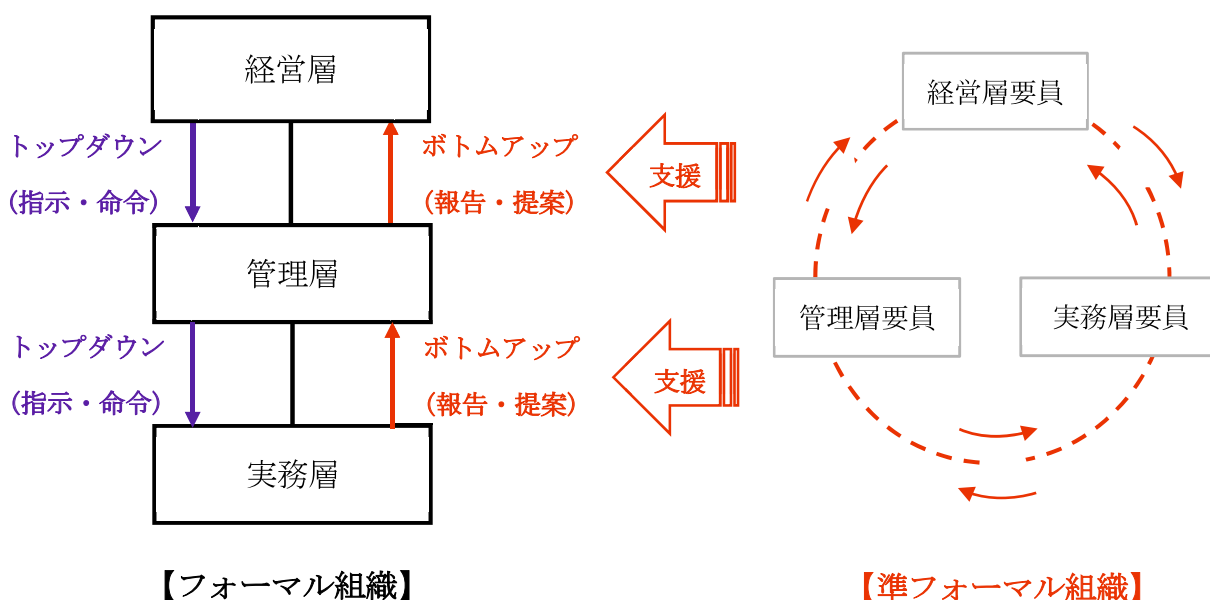


図-5.1 フォーマル組織と準フォーマル組織の関係図

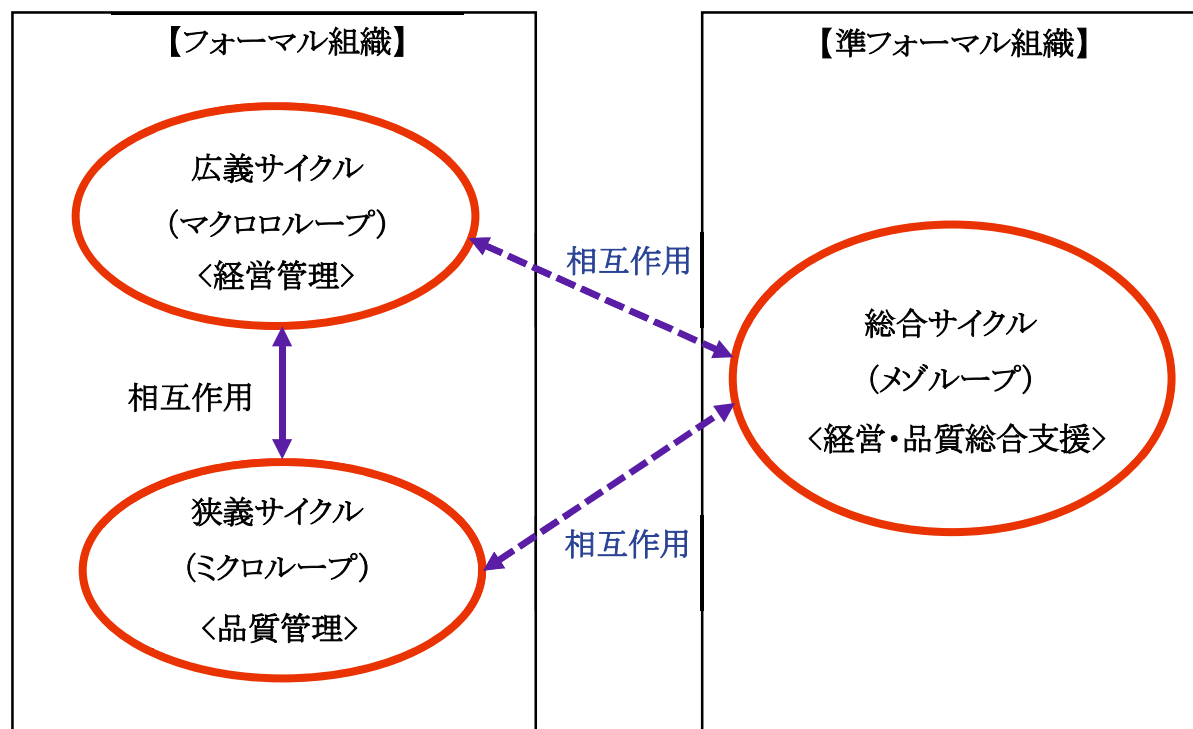


図-5.2 フォーマル組織と準フォーマル組織でのマネジメント体系図

これより、各組織の役割分担は、フォーマル組織で従来マネジメントの実用進化、準フォーマル組織で将来マネジメントへの展開に区分される。この分担は、組織構成強化にあわせた組織機能強化を図ることが可能となり、高度な将来マネジメントに向けた意志決定に貢献することが期待できる。

(3) コミュニケーション強化

第4章第4節実効的なコミュニケーションの提案と第5節実効的なコミュニケーションツールの提案は、従来マネジメントの実用進化に対する提案であった。ここでは、上記の組織構成強化と役割分担強化を前提に、将来マネジメントへの展開に向けたコミュニケーション強化の具現像を提案する。

一般に、フォーマル組織は、権限と役割分担を明確化したものである。その明確化には、長所・短所が存在しており、特に意志決定の迅速化に対しては顕著な短所となっている。この短所に対応した準フォーマル組織は、階層のないフラット構造による自由闊達な意見交換や発想抽出が可能で、フォーマル組織の権限や役割を超えた繋がりによって、創発可能性が高いものである。このコミュニケーションは、フォーマル組織の各階層メンバーによる外部環境の把握と課題集約と解決構想案策定まで、各階層が一体化して取り組むための基本となるものである。

ここでは、上記の簡易な具体化として、トンネル照明設備の劣化に対する更新計画を事例とした場合を検討する。フォーマル組織では、実務層で更新計画の基礎となる本モデルからの更新対象範囲の限定、新材料の検討、更新費用の算出を行う。管理層では、その結果に基づいて、費用対効果の確認をする。経営層では、経営成果であるアウトプットの反映と成果効率を確認する。これらの作業が段階的に実務層⇒管理層⇒経営層へと報告・提案されて、最終的な意志決定に至るものである。一方、準フォーマル組織との組み合わせでは、上記内容と一体化による点検・モニタリング方法や設備仕様へのフィードバック、新材料・新工法の試行検討、効率的な調達方式の検討のような関連内容を包含した進化的解決構想案を策定することが可能となる。また、検討段階で、準フォーマル組織メンバーが、各所属階層への情報共有と意見集約を得ることで、最終構想をフォーマル組織で提案する際にも各階層の合意形成が迅速になり、最終的な意志決定も迅速化することが期待できるものである。このように、準フォーマル組織のコミュニケーションには、重要事項が2点ある。

第1点目は、自発的なコミュニケーションである。準フォーマル組織は、ルーチン化されたフォーマル組織とは異なるため、通常は検討しないものを自然発生的に課題抽出し、その解決策を検討する自己組織的なコミュニケーションである。

第2点目は、観察的なコミュニケーションである。準フォーマル組織は、将来マネジメントに向けた対応が目的であるため、内外環境を観察して、敏感に状況変化を把握した上で、課題抽出に展開することが必要となる。このためには、個人的な情報収集では、限界があり、恣意的にもなるため、所属する階層要員との情報共有と情報収集が不可欠である。つまり、内外観察を基本としたコミュニケーションである。

これらを踏まえたコミュニケーションは、本モデルにおける健全度解析結果の可視化のような情報可視概念を保有したツールが不可欠であり、このツールによる可視が、各層のメンバーの自発性や観察性の促進にも寄与するため、コミュニケーション機能の強化にも貢献するものである。

第5節 まとめ

本章では、将来の少子高齢化や高度情報化の環境変化に対応したマネジメントとして、狭義的マネジメントと広義的マネジメントの視点から具現像を提案したものである。

狭義的マネジメントでは、マネジメントサイクルの実行段階を中心に点検・モニタリングやデータ管理における人的・機械的な共存スタイルのマネジメントを提案した。また、データ解析では、本モデルを対象に機械的モニタリングによる連続データ対応として、遷移確率の時間発展へのモデル拡張事例を示した。

広義的マネジメントでは、マネジメントの機能強化（組織の構成・役割分担・コミュニケーション）として、準フォーマル組織形成とフォーマル組織との機能分担とその内容を踏まえたコミュニケーションが自発性と観察性を保有しており、そのコミュニケーションツールでの情報可視概念の重要性について解説した。

このように、マネジメントの進化によって、マネジメントを構成する組織や構成要員も変化し、最適なマネジメントに相応したスタイルへと変化していくことになる。これは、マネジメントが、内外的環境変化に応じて生態的に自己組織化していくものであると考えられる。

今後、人間と機械の役割は、時間変化で多様に変化することが想定されるが、どの時代においてもマネジメントにおける意志決定は、絶対的な人間の役割である。つまり、機械化や組織化を改変活用させた調和型マネジメントの形成は、マネジメントの最適性を保持する有力なものである。そのマネジメントの基本が人間中心であることは、従来からも、また、今後においても、不変である。

参考文献

- 1) 榎谷正人：ビギナーズ経営組織論，中央経済社，2018.
- 2) 土木学会編：アセットマネジメント導入への挑戦，技報堂出版，2005.
- 3) 橋本剛明，唐沢かおり，磯崎三善年：大学生サークル集団におけるコミットメント・モデルー準組織的集団の観点からの検討ー，実験社会心理学研究，Vol.50, No.1, pp.76-88, 2010.
- 4) 二瓶哲：日本における職場交流の形式についての一考察ー社会的文脈から今後の動向を見据えてー，日本大学大学院総合社会情報研究科紀要，No.21, pp.333-344, 2020.
- 5) 庭本佳和：組織把握の次元と視点ー組織の境界再考ー，甲南経営研究，Vol.43, No.4, pp.29-63, 2003.

第 6 章

結 論

第6章 結論

第1節 本研究のまとめ

アセットマネジメントは、高度経済成長期から建設された各種の社会基盤施設における老朽化に対応できる資産管理方法として大きな効果を発揮している。しかし、社会基盤施設の管理を取り巻く環境は、高度情報化と少子高齢化が加速する厳しい状況にある。特に、AI や IoT に代表される機械化進展と熟練技術者リタイアや継承者減少の傾向は、今後も益々深刻化していくことが想定される。そのため、本論文では、アセットマネジメントの基本となるマネジメント論やシステム構造の基本となる一般システム論を踏まえたマネジメント体系やその機能を明確にし、取り巻く環境変化に相応可能なアセットマネジメントの運営として、数理解析モデルを実効的に活用する手法の提案をしたものである。本論文は、アセットマネジメントの本質となる提案であるため、現状における実効的マネジメントの導入や定着、また、将来の環境変化に対応したマネジメント形成においても参考となる基本内容である。その具体として、本節では、各章の成果を示す。

第1章序論では、本論文の目的と全体構成を明確化した。また、マネジメント論と一般システム論から、対象物がトンネル照明設備であることの適正を理論的に説明した。そして、本論文のトンネル照明設備を対象とした限定論が、社会基盤施設を対象とする一般論への展開可能性を明示した。

第2章アセットマネジメントの現状と課題では、現状の社会経済状況を踏まえたアセットマネジメントの目的と役割について、マネジメント論を基本に円環型ダブルループ構造のマネジメント体系とその仕組みを踏まえて解説した。これらを前提に、現状のアセットマネジメントにおける課題を狭義的マネジメント（マイクロマネジメント）と広義的マネジメント（マクロマネジメント）で抽出した。各課題は、次のとおりであった。

狭義的マネジメントの主要課題は、マネジメントの品質向上と定着確保であった。また、広義的マネジメントの主要課題は、マネジメントの効率化と価値追求であった。これらの

課題は、密接に関連しており、その課題解決の主体支援は、狭義的マネジメントの成果（アウトプット）となる社会基盤施設の状態解析プロセスとその手法の情報共有化であった。

第3章狭義的観点からの提案では、第2章の狭義的マネジメントの課題について、トンネル照明設備を対象に状態健全度の解析プロセスを明確化した本モデルを提案した。本モデルは、劣化や損傷の状態を健全度により、同認識で共有可能とするものである。また、データの量や内容に応じた簡易性と拡張性を保有したモデルである。本モデルが、狭義的マネジメントの課題に対応可能なツールであることを具体事例として、次の3点を示した。

第1点目は、現状の点検データに応じた健全度算出を示すことで、現時点の状態把握や更新・補修計画策定等の狭義的マネジメントにおける重要ツールとなることを示した。

第2点目は、比較的劣化が早い鋼板製灯具を対象に、簡易補修による機能延長化を実施するため、最適補修数を検討した。その際、最適補修数は、全体数に対する補修数割合である最適補修率として、補修費用を加味したLCCを考慮した最適補修率を本モデルで算出した。これにより、補修費用を加味したLCCに対する本モデルの適用性を示した。

第3点目は、地震リスクを加味した健全度予測と更新時期を算出することで、災害リスクを加味したマネジメントにも本モデルが適用可能であることを示した。

これら3点の適用事例から、本モデルが、狭義的マネジメントの課題に対応した重要ツールであることを示した。更に、狭義的マネジメントの品質向上には、本モデルを機能的に活用させるため、点検データ等の各種データの精度向上とデータ蓄積が不可欠である。これらを考慮した本モデル活用は、狭義的マネジメントにおける多様性や適用性向上と拡張性展開に繋がるものであり、マネジメントツールとしての価値も高まるものである。

第4章広義的観点からの提案では、第2章の広義的マネジメントの課題について、広義的マネジメントにおけるコミュニケーションのあり方とそのコミュニケーションを支援するツールの理論的具現像を提案した。

その際には、企業組織の各層（実務層・管理層・経営層）の機能や役割の視点から、実態把握と共有が期待できる実効的なコミュニケーションの具現像を示した。そして、そのコミュニケーションには、数理解析モデルがコミュニケーションの支援ツールとして貢献することを社会システム論のコミュニケーション定義を踏まえて、第3章での本モデルによる健全度予測の具体事例で示した。また、コミュニケーションツールは、組織成長度と簡易モデルと複雑モデルの利用を比較することで、コミュニケーションの実効性とイノベーション発現の可能性を理論的に明確化した。これらは、本モデルをコミュニケーション

ツールとした場合、マネジメントが定着するまでの適用妥当性と成長段階でのモデル拡張の必要性を明確にしたものである。

第5章アセットマネジメントの新展開への提案では、将来の少子高齢化や高度情報化の環境変化に対応したマネジメントとして、狭義的マネジメントと広義的マネジメントの視点から具現像を提案した。

狭義的マネジメントにおいては、点検・モニタリングやデータ管理における人的・機械的な共存スタイルのマネジメントを提案した。また、データ解析では、本モデルを対象に機械的モニタリングによる連続データ対応として、遷移確率の時間発展へのモデル拡張事例を示した。

広義的マネジメントにおいては、マネジメントの機能強化（組織構成・役割・コミュニケーション）として、コミュニケーションの活性化が可能な準フォーマル組織を加えた組織形成を提案した。そして、このような組織の機能と役割を踏まえて、自発性と観察性を保有したコミュニケーション形成と、そのためのコミュニケーションツールによる情報可視概念の重要性について解説した。

一般的に、マネジメントとは、内外的環境変化の認識と連応した変革で効力を発現するものである。現在、アセットマネジメントの導入や実施が盛んになっている中で、マネジメントの最適性には、実効性の追求が不可欠である。本論文では、その具体手法として、本モデルの狭義的マネジメントにおける機能を解説し、その効果を明示した。そして、広義的マネジメントでは、本モデルが実効的コミュニケーションの重要ツールとなることを明示した。

これらより、本モデルをマネジメントツールとして活用するマネジメントスタイルは、現状マネジメントの品質向上と定着に貢献すること、また、今後の内外的環境に応じた生態的な進化マネジメントへの新展開が期待できることを示した。

第2節 将来マネジメントに向けて

本論文は、マネジメント理論を基本に、社会資本のアセットマネジメントの特性から最適なマネジメントを追求するための数理解析モデルによる実効的な活用手法を提案したものである。社会資本マネジメントの基本は、従来から将来においても、資産機能の確実な発現による安全・安心の確保に変わりはない。しかし、内外環境変化により、マネジメントの価値観は、時間や空間に伴った変化が生じることは否めない。その価値観を最大化するためには、時間的・空間的な変化に見合ったマネジメントであることが必須条件である。そのマネジメントには、次の3点が重要である。

第1点目は、環境変化に対する管理運営する組織全体での同一認識化である。これは、コミュニケーションの強化のみならず、そのマネジメントの本質概念に対する認識の共有化である。

第2点目は、マネジメントの基礎作業である資産の状態把握・データ管理・データ解析では、環境変化に対する対応変化の追跡可能なものとして、検証とフィードバックを可能にしておくことである。

第3点目は、環境変化に対するマネジメントの検証や見直し確認を常に実施して、最適性の確保をすることである。そのためには、上記の第1点目と第2点目が不可欠であることは明確である。

これらの重要点を踏まえたマネジメントを実施することは、現在のマネジメントの最適化と将来マネジメントへの進化に大きく貢献するものである。

財政事情が厳しくなる中で、社会資本のアセットマネジメントが、環境変化に見合った最適なマネジメントとして、その機能と価値を発現することを期待するものである。

謝 辞

はじめに、本学で研究ができましたことに感謝いたします。

次に、本研究に関しまして、貴重なご教授、ご指導、並びに、ご指摘を賜りました先生方に対しまして、心より感謝いたします。

担当教官で主査の河村圭先生には、本研究や論文作成におけるご指導を賜りましたことに感謝いたします。また、本研究の意図をご理解いただきまして、学際的になることを許容いただきましたことにも感謝いたします。河村圭先生には、専門外の方々にもご理解をしていただける研究や論文を基本にすることの重要性をご教授いただきました。この基本は、本研究の原点であり、意図するところでありました。そのため、本研究における再認識や再確認の重要な契機となりました。

副担当教官で副査の進士正人先生と中村秀明先生には、審査・公聴会におきまして、貴重なご教授やご指摘を賜りましたことに感謝いたします。進士正人先生には、点検やデータ処理の観点から、解析結果と実態との整合の重要性をご教授いただきました。中村秀明先生には、本解析モデル特性や他モデル比較によって、本解析モデルにおける適用の条件や範囲を明確化することの重要性をご教授いただきました。これらのご指摘は、本解析モデルやそのデータ処理における基本原理の追求となって、本研究の意図に大きく近づくことになりました。

副査の田村慶信先生と柳原宏先生には、審査・公聴会におきまして、信頼性工学と数理解析学の観点から、本解析モデルのご確認と貴重なご指摘を賜りましたことに感謝いたします。これらのご指摘は、本解析モデルの適用性に対する再確認になりました。

また、本論文は、学際的になっているため、基本となる各種理論について、本学の先生方から貴重なご指導やご指摘を賜りました。

工学系では、伊藤暁先生、合田公一先生、浜本義彦先生、若佐裕治先生にご指導を賜りました。理学系では、川村正樹先生、白石清先生、柳研二郎先生にご指導を賜りました。

工学系では、伊藤暁先生に遷移確率の基本となる状態遷移のご指導を賜りました。合田公一先生には、材料工学の信頼性モデルと比較した観点から、本解析モデルについてご指導やご指摘を賜りました。浜本義彦先生には、実験計画法等による解析データの取り扱い方法についてご指導を賜りました。若佐裕治先生には、マネジメントの根幹となる制約的最適化理論についてご指導を賜りました。

理学系では、川村正樹先生にマルコフ理論を俯瞰するため、隠れマルコフ理論についてご指導を賜りました。白石清先生には、本解析モデルの量子化拡張について、物理学的観点からご指導を賜りました。柳研二郎先生には、本解析モデルの量子化拡張における数学的観点からのご指導とあわせて、本研究の数理解析全般におけるご指導やご指摘を賜りました。柳研二郎先生から数理解析モデルと実体の双対について詳細なご指導を賜りましたことは、本解析モデルの基本特性の理解への到達となりました。

このような本学の先生方の貴重なご教授、ご指導、並びに、ご指摘により、本論文は、各種理論の基本原則を踏まえた学際的内容となりましたことに心から感謝いたします。

最後に、本研究の行末を遠くから見守ってくれた家族に感謝いたします。

先生方の記載は、五十音順としております。