

# インフラマネジメント×データサイエンス

大阪大学大学院工学研究科 地球総合工学専攻

社会基盤工学コース 社会基盤マネジメント学領域 准教授

貝戸 清之

## 1. はじめに

本研究では、道路、橋梁、トンネルなどに代表されるインフラストラクチャ（以下、インフラ）を対象に、その補修や更新に関するマネジメント施策を扱う。特にマネジメント施策を形成する過程においては、インフラの劣化予測と寿命評価が極めて重要な判断指標となる。本稿においては、インフラの目視点検データを用いた統計的劣化予測をその判断指標（客観的エビデンス）として位置付けるための基本的な概念を紹介する。

我が国には、膨大な数のインフラが存在する。インフラの老朽化問題は周知の事実であり、老朽化は年々確定的に進行している。しかし、実在するインフラの耐用年数（平均寿命）に関しては、これまで定量的な評価がなされることはなかった。米国では世界恐慌後のニューディール政策（1930年代）によって膨大な数のインフラ（例えば、橋梁）が建設され、それから50年が経過した1970年代から1980年代にかけて、老朽化を原因とする落橋事故が立て続けに発生した。この事故を契機に米国全土で道路インフラの点検・調査が実施され、大半の道路インフラに深刻な劣化や損傷が認められるに至った。これらの事実は「荒廃するアメリカ」というレポートとして報告されている。我が国では、この米国での事例を唯一の根拠に、橋梁の平均寿命が50年と考えられており、高度経済成長期（1970年代）に団塊的に建設されたインフラの老朽化が顕在化しつつある社会問題として注目されている。実際に、2014年に発生した中央自動車道笹子トンネル天井板落下事故を契機に、国内においてもインフラの老朽化が問題視され、橋梁やトンネルなどに対しては5年に一度の近接目視点検が義務化された。また、Society 5.0においても、「インフラ維持管理システム」「防災・減災システム」が仮想空間と現実空間とを高度に融合させた新たな未来社会のコンセプトとしてあげられている。

現在の我が国においては一部インフラの老朽化が問題となりつつあるが、総じて言えば、インフラの健全性は適切に保たれ、計画的な維持管理が実施されている。その一方で、上述したようにインフラの平均寿命でさえ定量的に評価がなされているとはいえない状況にあることも事実であり、現状のマネジメント施策は、ベテラン技術者の長年の経験と知識（特に、現場でインフラの健全性を目視点検によって評価して、投資タイミングを見抜く能力、劣化や寿命を予測する能力）に依るところが大きい。しかし、これはいわゆる前例、経験に基づく施策形成で

あるという批判を免れず、①高度経済成長期整備された我が国のインフラの団塊的老朽化、②日本社会のダウンサイジング（人的・予算的リソース縮小、既存インフラの取捨選択）、③ベテラン技術者の経験・知識と、センサー・ドローン・ICT・AIなどの革新的技術の混在など、インフラおよびその周辺環境の劇的な変化の中で、今後、適切なリソース配分が困難になるという実務的課題がある。

## 2. インフラマネジメントの概念

マネジメントの概念を単純化すると、図-1のように「情報」「知識」「意思決定」という3つのプロセスが循環する構造となる。マネジメントとは、最終的に何らかの意思決定（インフラを補修するか否か、更新するか否かなど）を行うための計画立案とその管理であると考えられる。当然ながら、「意思決定」には「知識」が必要となり、「知識」を獲得するためには「情報」が不可欠である。また、最終的な意思決定に至るまでには、通常何らかの制約が課せられる。インフラのマネジメント施策であれば、管理する構造物の数量、経年、種類、状態などが、さらに管理者の人員、技術力、予算などの組織体制も制約となる。また、管理者の所属する組織の体質、企業文化や歴史、その時々々の社会情勢も制約になる。このような制約条件は、インフラ管理者個々によって多かれ少なかれ異なる。管理者は、個々に課せられた制約の下で試行錯誤して意思決定を下し、長年に亘る意思決定過程の中で経験（ノウハウ）を獲得していく。一般的に、インフラのマネジメントや維持管理が経験に依存するという所以はこのような事情によると考えられる。したがって、インフラのマネジメント施策の本質は、ベテラン技術者の経験を視覚化する、すなわち経験に基づく知識という暗黙知を形式知化することにあるといえる。従来、ヒトからヒトへ直接的に伝えられてきた経験や知識に対して、視覚化された方法論をヒトとヒトとの間に介在させることで、より広範に、より普遍的に技術継承を行うこともできる。理想的なインフラのマネジメントは、新しい技術継承の在り方を提供し、その持続可能性に貢献するような方法論でもある。

インフラの補修や更新に関するマネジメント施策を立案するためには、基本的にインフラの劣化予測とインフラの生涯に発生するライフサイクル費用の計算が必要となる。インフラの劣化を高精度に予測することができ

ば、ライフサイクル費用の計算はさほど複雑ではないために、すでに国内外で数多くのマネジメント施策支援システムが提供されている（例えば、米国の橋梁マネジメントシステム Pontis, 世界銀行開発の舗装マネジメントシステム HDM-4 など）。しかし、①肝心の劣化予測の精度が悪いこと、かつ②実際の点検データが劣化予測に反映されないといった問題点から、これらの支援システムは、実務では全く稼働していないといった問題点がある（すなわち、暗黙知であったとしても高精度なマネジメント施策が立案可能である状況下で、精度が低いマネジメントシステムをあえて使用するインセンティブはない）。

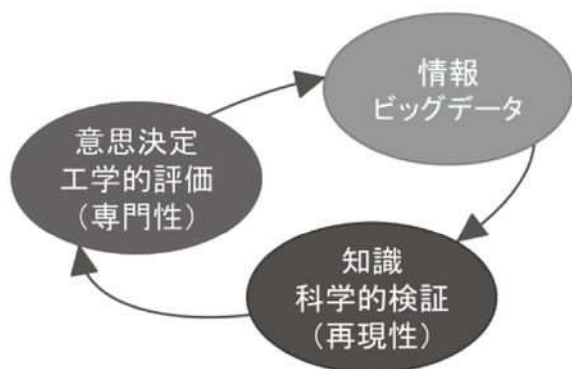


図-1. マネジメントの概念

本研究では、このような実務的課題を解決するという問題意識のもと、実務との整合性の高い目視点検データを活用した統計的劣化予測（科学的アプローチ）とその結果である劣化曲線と寿命（科学的エビデンス）をインフラの補修や更新に関するマネジメント施策の立案に採用する点に特徴を有する。ベテラン技術者の経験や知識（劣化予測技術）は無形財産であり、彼らのリタイアとともに喪失される。一方で現場には彼らが蓄積してきた大量の点検データが残されている。高度情報化社会と言われる今日において、このようなデータはまさしくビッグデータである。しかし、これまで点検データはインフラの表面状態を目視しただけの多段階の離散的評価（主に5段階評価）であること、点検結果にはヒューマンエラーが混入することなどから、例えばセンサーで計測したデータと比較して「汚いデータ」として扱われ、学術的にも、実務的にも活用されることはなかった。しかし、こうしたビッグデータの背後にはインフラの劣化過程が隠されており、近年発展が著しいデータサイエンス技術を駆使することによって、これらを炙り出すことが可能になると考えられる。現場で取得できる最もプリミティブなデータをもとに、マネジメント施策立案において最も困難なインフラの劣化予測と、それに基づく施策立案に挑む点（科学と施策の共進化）に本研究の独創性がある。

### 3. 基幹技術としての「マルコフ劣化ハザードモデル」「混合マルコフ劣化ハザードモデル」

インフラの劣化予測は、疲労試験や材料試験を通して

劣化・損傷のメカニズムを解明した上で理論的検討、あるいは経験則に基づいて劣化予測式が獲得され、実際のインフラの劣化予測に適用されることが多い（マニュアルや技術基準として採用されることが多い）。しかし、実際のインフラは多種多様な使用条件や環境条件下で供用されることが多く、その劣化過程には不確実性が大きく介在する。環境条件が整備された実験を通じて獲得された劣化予測式を実際のインフラの劣化予測に適用するには限界がある。

一方で、実務に目を転じれば、膨大な目視点検データが蓄積されつつある。目視点検データは、インフラの外観状況を中心に点検員が俯瞰的に評価した多段階の離散値（例：1, 2, 3, 4, 5 や S, C, B, A, AA など、一般的には5段階）で獲得される。本研究では、膨大な点検データの背後に存在する統計的規則性をマルコフ劣化ハザードモデル<sup>1)</sup>や混合マルコフ劣化ハザードモデル<sup>2)</sup>として定式化するとともに、その推定アルゴリズムを開発した<sup>3)</sup>。ハザードモデルは寿命を推定するための一般的な確率モデルである。ただし、ハザードモデルが対象とする事象は生存確率の時間的変化であるので、観測されるデータは「生」か「死」かの二値データである。一方で、インフラの健全度は多段階であるから、多段階の状態推移を表すマルコフモデルに対して、状態間の推移をハザードモデルで表現するマルコフ劣化ハザードモデルを開発した。マルコフ劣化ハザードモデルではインフラの平均的な劣化過程および平均寿命を推定できるほか、大型車交通量や気温など、インフラの寿命に影響を与え、かつ観測可能な要因（構造条件、環境条件、使用条件）による寿命の変動幅を考慮することができる。これにより管理対象となるインフラ群の全体的な予算計画を立案する際に有益な情報を提供できるようになる。その一方で、個々のインフラの寿命は多様であり、2, 3の劣化要因で表現できるものではない（平均的な劣化過程および平均寿命で捉えきれものではない）。マネジメント施策を立案するためには、インフラ個々に寿命を評価する必要がある。そのために、不可観測要因に基づくインフラ個々の寿命の相違（異質性）を考慮した混合マルコフ劣化ハザードモデルを開発した<sup>3)</sup>。これにより、インフラの寿命をマクロ（マルコフ劣化ハザードモデル）にも、ミクロ（混合マルコフ劣化ハザードモデル）にも表現することが可能となった。この基幹技術は、国内ではNEXCO西日本、阪神高速、近畿地方整備局など、数多くの管理者で共同研究実績があるほか、海外でもベトナム、エチオピアで導入実績を有する（今後、ミャンマー、インドネシアでも試行的に導入予定）。

### 4. 適用事例

橋梁に対して実施された目視点検データを用いて、マルコフ劣化ハザードモデルで推定したRC床版（橋梁の維持管理を行う上で重要な部材の一つ）の劣化予測結果を図-2に示す。同図は米国ニューヨーク市（NY市）の目視点

検データ(全32,902サンプル)を用いている。NY市では、橋梁に対する目視点検を7段階の健全度で評価している。

1が最も健全な状態で、7が使用限界の状態である。同図より、NY市のRC床版の寿命は平均で39.8年であることがわかる。また、図中には示していないが、大型車交通量が最も多い路線ではRC床版の寿命が約30年、最も少ない路線では橋梁の寿命が約45年となった。したがって、NY市においては、RC床版の平均的な寿命は約40年で、それらは大型車交通量の多寡によって約15年変動することが明らかとなった。このとき、留意すべき点は、この結果はNY市のみにも適用可能であるということである。図-2は32,902サンプルを用いて推定した曲線であるので、NY市に関しては劣化過程および平均寿命の信頼性は高いといえる。しかし、同じ結果をNY州や隣のニュージャージー州に適用することはできない。統計分析であるから、推定結果は適用地域にのみ採用される限定的な成果であり、推定結果に普遍性はない。その推定方法に普遍性を有する。

さらに、混合マルコフ劣化ハザードモデルを用いて推定された個々のRC床版の劣化過程を図-3に示す。今回の解析では、橋梁数は1,481橋であった。図-3には1,481橋分の劣化曲線を示している。図-2に示したマルコフ劣化ハザードモデルによるRC床版の劣化予測においては、大型車交通量の変動による期待寿命の不確実性は約15年であった。一方、図-3の混合マルコフ劣化ハザードモデル

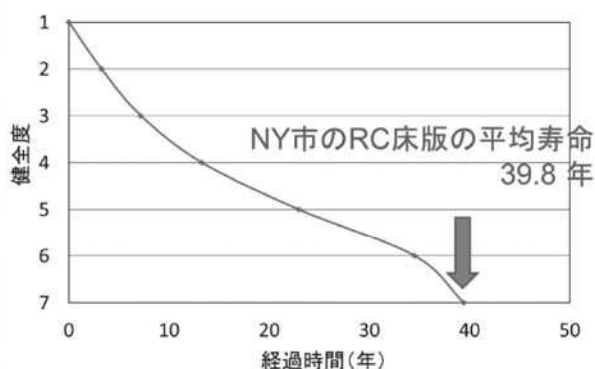


図-2. RC床版の期待劣化パス

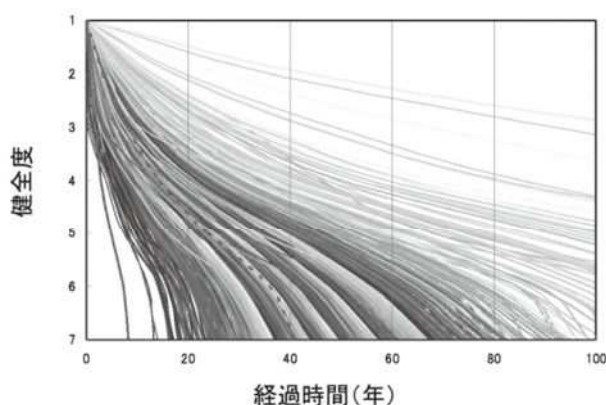


図-3. 橋梁別のRC床版の劣化曲線

を用いた際の変動は、100年以上となっている。したがって、混合マルコフ劣化ハザードモデルによる劣化予測結果の方がRC床版の劣化過程および寿命の多様性をより反映していることが理解できる。さらに、これまで統計的劣化予測は管理対象となるインフラ群のマクロな劣化予測に適していると言われてきたが、同図から理解できるとおり、著者らの基幹技術では個々の橋梁(全1,481橋)のミクロな劣化過程を推計することが可能となっている。

## 5. おわりに

著者は、民間企業で技術者として5年間、橋梁の目視点検業務に従事してきた。目視点検業務はいわゆる3Kの職場であるが、同時に橋梁の安全を守るというやりがいがある職場でもある。一方で、目視点検は橋梁の悪い箇所を探す行為であるとの認識が根強く、悪い箇所がなかった橋梁の目視点検データは実務に活用されることが全くなく、死蔵されるだけの状況であった。目視点検データを実務の意思決定(マネジメント施策)に反映させるという問題意識のもと、著者はその解決に向けて大学に身を転じ、目視点検データに基づくインフラの統計的劣化予測手法の開発に取り組み、学術的な研究成果をあげてきた。しかし、最終的な目的は、統計的劣化予測手法で算出されたインフラの劣化曲線および平均寿命を科学的エビデンスとして、インフラのマネジメント施策立案に反映させることであり、その研究はようやく緒に就いたばかりである。その一方で、本研究では目視点検という離散値データを扱っているが、ドローンやIoTの普及により、センサーデータのような連続量データが豊富に獲得されることも想像に難くない。インフラの点検が目視点検からモニタリングに推移する過渡的状态、移行後の状態を見据えたインフラマネジメントの在り方を考える必要がある。また、現状で獲得できる実務データを意思決定に十分に反映できていないという事例はインフラの維持管理だけでは留まらない。維持管理の範疇、さらには土木工学の範疇を超えてマネジメント×データサイエンスの研究分野を深度化させていきたい。

## 参考文献

- 1) 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.
- 2) 小濱健吾, 岡田貢一, 貝戸清之, 小林潔司: 劣化ハザード率評価とベンチマーキング, 土木学会論文集A, Vol.64, No.4, pp.857-874, 2008.
- 3) 貝戸清之, 小林潔司: マルコフ劣化ハザードモデルのバイズ推定, 土木学会論文集A, Vol.63, No.2, pp.336-355, 2007.

(東京大学 社会基盤 平成12年博士)