



小林 潔司

京都大学名誉教授・JAAM 会長

デジタル・アセットマネジメント

1. はじめに

インフラの長寿命化を目的とするアセットマネジメントが提唱されて久しい。我が国でも、目視点検等を通じて膨大な点検データが獲得され、インフラの維持補修の成果に関する情報も蓄積されてきた。その間、ビッグデータを用いた統計的劣化予測技術、ベンチマーク分析、プロファイリング手法の開発や ISO 55001 によるマネジメント基準の策定により、アセットマネジメントの方法論が発展してきた。センサー等を用いた常時モニタリング技術や時系列解析の手法、AI 技術を用いた劣化診断等の高度化技術等も実用化されている。人工衛星、ドローンやレーザーを用いた計測技術、3次元 CAD 技術、AR・VR などの XR 技術、さらには Spring-8 などの X 線 CT 技術の発展により、サイバー空間でインフラをモデル化したデジタルツインの実現が現実になってきた。高度なデータ解析技術を用いたインフラのデジタルマネジメントの新しい潮流が生まれつつある。

現実社会の対象物と同じもの（双子）をサイバー空間上に作り上げる。それをデジタルツインと呼ぶ。デジタルツインを作成する空間的次元スケールの多様性により、人工衛星から地球を計測するような巨視的レベルから、鳥瞰的スケールでインフラを表現する BIM/CIM、等身大スケールでインフラを表現する XR 技術、さらには分子レベル・原子的レベルでインフラを表現する微視的なレベルに至るまで、さまざまなデジタルツインが作成可能である。このような技術の空間スケールと対応して、衛星画像等を用いてインフラネットワーク全体をマネジメントするレベル、レーザー情報やセンサーシステムを用いて構造物全体をマネジメントするレベル、ドローンや非破壊試験等の技術を用いて部材・部位をマネジメントするレベル、さらに材料物性の

視点からインフラの耐荷性や耐久性のメカニズムをマネジメントするレベルまで多様な広がりを持っている。

周知のように、1990 年代にアメリカ合衆国においてアセットマネジメントの考え方が生まれた。そこでは、インフラの点検結果に基づいて劣化進行を予測し、予防保全の立場からライフサイクル費用の評価に基づいて維持・補修戦略を立案し、そのために必要な予算水準と維持補修の優先順位が決定される。当時の計測技術、通信技術、データ解析技術等のデジタル技術が前提となり、インフラの部材・部位の点検情報に基づいてライフサイクル費用評価を主眼とする第 1 世代のアセットマネジメントが確立した。このような視点で、橋梁分野における PONTIS、舗装分野における HDM-4 等のソフトウェアが開発された。このような方法論は、さまざまな分野におけるアセットマネジメントのプロトタイプになっている。第 1 世代のアセットマネジメントは、その開発当初からマネジメントで用いる点検結果（レーティング）と現実の劣化事象との対応関係が不十分であり、その内容が点検者の技量や能力に影響を受けることが指摘されていた。さらに、新規技術の耐久性に関する情報が存在しないため、せっかくのイノベーションの成果を現場に導入できないという本質的な限界が存在している。

現在、労働力不足、大規模補修・更新のための資材不足、都市圏部における重交通や EV 車両への対応、地方部における維持補修の効率化、さらには循環型社会に適合した持続可能なアセットマネジメントが求められている。大規模補修・更新などを通じてインフラの長寿命化（耐荷性、耐久性の向上）を達成するイノベーションが不可欠である。デジタル技術の進展により、新工法・新素材等の開発やその成果をアセットマネジメント

に導入することが可能になってきた。当然のことながら、アセットマネジメントのデジタル化をデジタル・アセットマネジメントと呼ぶことができる。しかし、本稿では、デジタル技術を駆使することにより、インフラのイノベーションの成果を実装化すること目的とした新世代のアセットマネジメントを「デジタル・アセットマネジメント（DAM: Digital Asset Management）」と呼ぶこととする。

2. デジタルツイン

現実社会の対象物と同じもの（双子）をサイバー空間上に作り上げる。それをデジタルツインと呼ぶ。すでに述べたように、さまざまな空間次元におけるインフラのデジタルツインを作成できる。空間次元の違いにより、現実空間の解像度や対象とする空間の範囲は多様に異なる。都市空間や建築物・インフラを対象とした BIM/CIM は、鳥瞰的スケールで作成されたデジタルツインである。製造業のデジタルツインと異なり、インフラは極めて複雑であり、完全な計測情報を獲得することは不可能である。現場で施工されるインフラが設計図どおりに建設されている保証はない。時間の経過とともにインフラの劣化が進展する。サイバー空間に構成されるデジタルツインが、現実世界におけるインフラと正確に対応する保証はない。本来、デジタルツインは、計画・設計・施工・維持補修と続くライフサイクルの各段階において必要な情報を包括的に表現するプラットフォームになることが望ましい。残念ながら現行の BIM/CIM は、そこまでの機能を有していない。アセットマネジメントのために必要な情報をデジタルツイン上で包括的に表現しようすると、インフラを表現するサイバー空間の構成があまりにも複雑になる。現時点では、BIM/CIM を中心とした鳥瞰的デジタルツインを中心に

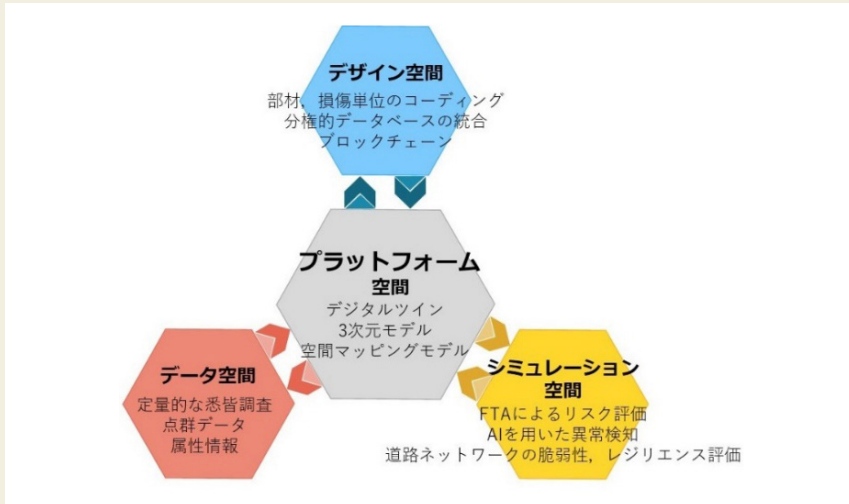


図1 DAMSの構成

DAMが発展しつつあるが、将来的にはマルチスケールのデジタルツインの統合化が大きな研究課題になるだろう。

サイバー空間において、インフラのアセットマネジメントを支援するデジタル・アセットマネジメントシステム (DAMS: Digital Asset Management System) と呼ぼう。図1に示すようにサイバー空間におけるDAMSは、アセットマネジメントに必要な情報を表現するプラットフォーム空間、インフラに関する設計情報を保管するデザイン空間、目視点検結果や点群データ等をマネジメントするデータ空間、インフラ管理のためのさまざまな検討やシミュレーションを実施するためのシミュレーション空間で構成される。プラットフォーム空間では、対象となるインフラがデジタルツインとして表現される。デジタルツインの表現方法は多様である。設計図が利用可能であれば、3D技術を用いてデジタルツインを構成できる。点群データ等の観測情報を用いてデジタルツインを構成することもあろう。この場合、デジタルツインはデータが観測された特定の時点におけるインフラを表現したことになる。プラットフォーム空間上に構成されるデジタルツイン上には、アセットマネジメントに必要な情報が記載されるとともに、デザイン空間やデータ空間に保管されているより詳細な情報がリンクされることにより、ディレクトリーとしての機能を持つ。時間とともにインフラの劣化が進展していく。このため、時間を通じてデ

ジタルツインが一定である保証はない。プラットフォームとしてのデジタルツインを、ことさら精緻に描く必要はないと思われる。ニーズに応じてデータ空間やデザイン空間に収納されている情報を用いて、必要とされる精度のデジタルツインを再構成できればいい。3次元空間で構築されたDAMSを4次元空間上に展開することにより、必要とされる時点のインフラ性能や劣化過程のトレーサビリティを確保することができれば理想的である。

3. BIM/CIMレベルのDAM

アセットマネジメントは、構造物全体を対象としたまるごとのリスクマネジ

メントでなければならない。マネジメントの網羅性が必要となる。点検台帳に基づく情報管理では、点検結果を部材・部位ごとに集約し、それぞれを単位とする劣化診断や補修戦略が検討されることが多い。具体的な補修戦略や補修設計を行う際には、個別の変状・損傷の特性や構造物全体の状況を判断して優先度を判定せざるを得ず、集約化された点検情報だけで充足することは不可能である。

DAMSを用いれば3次的に表現されたプラットフォーム上に、個別の変状・損傷や変位の情報を直接記述できるという利点がある。さらに、モニタリングを実施できていない箇所や慎重なモニタリングが必要な箇所を記述できる。現在、3次的に表現されたBIM/CIM空間上に点検結果や設計図書等のデータ群をリンクさせることにより、BIM/CIM表現された3次元プラットフォームをディレクトリーとして用いる試みが展開されている。このような3次元プラットフォーム化されたデータベース構造を有効化するためには、性能評価の対象となる構造物要素の基本単位に着目して、コード番号体系を用いて多様なインフラの構造物要素の全体構造をデジタル的に表現するとともに、損傷や変状、変位のタイプや種類、その重大度に関するデジタル化を実施し、アセットマネジメントの目的に応じて3次元プラットフォーム上に蓄積された情報をソーティング・集計化する

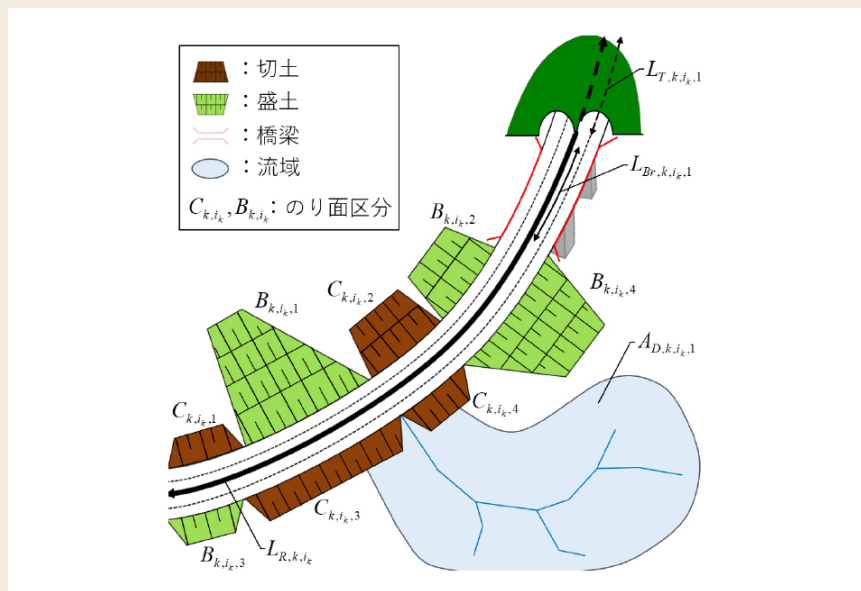


図2 プラットフォーム空間

方法をシステム化する。さらにDAMSは、様々な外力により、インフラに起こりえることをシミュレーション分析することも可能である。シミュレーション計算には、対象とするインフラをメッシュ等の計算単位に基づいて離散的に表現することが必要となる。デザイン空間に保管されたデータを用いて、メッシュ分割の自動化を図ることができる。

図2は、筆者が関わったマレーシアの道路マネジメントのためのプラットフォームである。2005年当時、デジタルツインや3D技術が未熟であり、道路インフラがトンネル、斜面、舗装等の複合的な構成要素の複合体であることが簡単な白地図のテンプレートとして表現されているに過ぎない。この白地図は道路管理者が道路システム全体のリスクをマネジメントするという明確な目的のために作成されたものである。道路管理者の立場に立てば、道路マネジメントにおいて生じるさまざまなリスクを統合的にマネジメントすることが要求される。道路のマネジメント上で問題となるリスク事項がテンプレート上に記載されることになる。

道路のリスクマネジメントにおいて留意すべきリスク事象は、自然災害リスクやインフラの老朽化リスクなど多様である。一般に、リスクマネジメントは、(1)対象とする事物に内在するリスクをモニタリングし、リスクの程度やリスクがもたらす被害の程度を評価するリスクアセスメント、(2)リスクアセスメントの結果に基づいて、リスクへの対応の優先度を評価し、必要な対応（補修や更新）方針を決定する意思決定というステップにより構成される。図2は、まさにリスクアセスメントの結果を見える化するためのテンプレートとして考案された。しかし、道路インフラで発生する多くのリスク事象は、図2で表現する各構成要素単位より局所的な範囲で起こりうる。さらに、橋梁等を考えても、インフラを2次元平面で表現することには限界がある。このような問題意識を背景として、対象とする道路インフラを3次元のより現実的なシステムとしてバーチャル空間上で表現する方法が模索された。デジタル技術の発展により、インフラの可視化技術

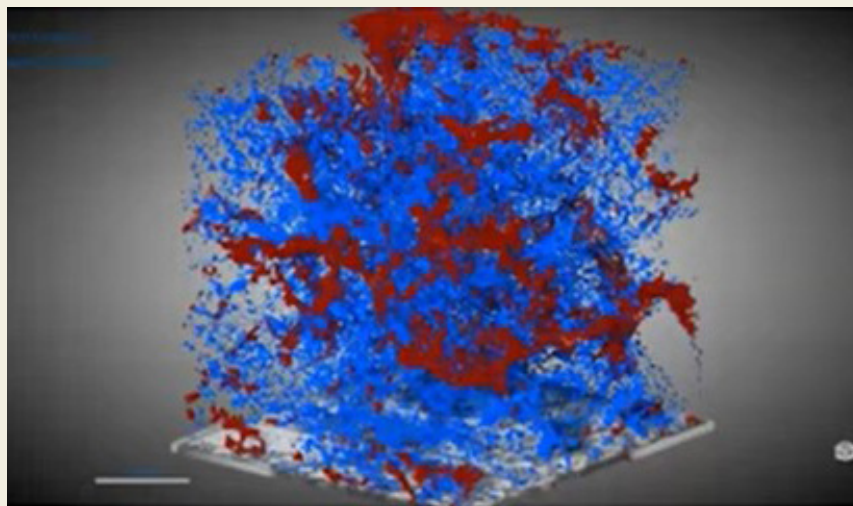


図3 舗装の物性構造

は著しく進歩した。そのようなデジタルツイン技術の発達とリスクマネジメントの考え方が結びつくところからDAMの考え方が生まれたのである。

わが国においても、道路インフラのリスクアセスメントの重要性が認識され、リスクアセスメント技術と同時にさまざまな技術指針などの制度的インフラが整備されてきた。残念ながら、リスクアセスメントに関する議論が、橋梁、トンネル、斜面、舗装等の要素技術的な議論にとどまっておき、リスクマネジメントという包括的な枠組みの重要な構成要素として位置づけられているわけではない。また、自然災害リスクとインフラ劣化リスクの統合的な取り扱いの重要性が認識されつつも、リスクマネジメントとしての方法論的な取り扱いには至っていない。インフラの3D表現技術の部分がデジタルツイン技術から切り取られ、さまざまなBIM/CIMとして精緻化が試みられた。リスクマネジメントのプラットフォームとしての本来の役割を失った多くのBIM/CIMは、その有用性を見いだせず迷走を続けているように思えてならない。

4. 物性レベルでのDAM

近年、気候変動に対応するためのカーボンニュートラル技術、リサイクリング技術、国土強靱化のためのレジリエンス技術の発展が求められる。これらの技術的課題に応えるためには、インフラ劣化に関わるミクロな物性レベルでの課題に対応した新素材の開発、新工法の開発等

が必要である。インフラの力学的劣化特性、劣化現象の力学的・統計的モデル化等に関する研究は長足の進歩を遂げたものの、「そもそも劣化とは何なのか」など、物性レベルにおける劣化現象の発現やその進展のメカニズムに関しては、ほとんど知見が蓄積されていないのが実情である。

SPring-8 (Super Photon ring-8 GeV)を活用した物性科学の進展により、微視的3D画像の数値解析モデルの展開、局所変位場計測による破壊経路解析、4Dデータのメタモデリング等を通じて、インフラの新素材や構造に関わるイノベーションが可能になってきた。図3はSPring-8を用いて劣化した舗装試供体の粒子レベルの断面画像を構成した結果を示している。図の青色の部分は舗装内部における空隙ネットワークを表す。褐色部分はインフラ外部に連結した空隙ネットワークであり舗装構造の劣化の進展に重大な影響を及ぼしている。舗装、コンクリート、土構造物の供試体の3次元データベースが試行的に作成された。SPring-8により計測されたデータ量を、3次元断面画像の動的解析を行うイメージプロセッシングの技術の開発が進められている。さらに、位相的データ解析という手法を用いてインフラ物性の空間形状的な特性を記述することができる。これにより物性特性と力学的特性の関係を分析することができる。またインフラの新素材、新工法の性能評価を行うためにはスーパーコンピュータを用いた劣化シ

ミュレーションが必要である。インフラに外力が作用すれば材料物性レベルでの粒子間相互作用が発生する。このような応力ひずみ関係は有限要素法などの計算手法が活用できる。問題はその先である。このような相互作用は物性構造そのものを変化させる。インフラ物性の構成方程式の動学変化をシミュレートする方法が必要になる。インフラ物性の構造変化自体は決められた力学的・化学的ルールに従って生起するのでプログラム化が可能である。このようなインフラ劣化の動学的シミュレーションに関する研究は緒についたばかりであるが、金属物性や新薬開発等の世界では、すでに基礎的・応用的研究が蓄積され実装化も進展している。インフラ物性学という新しい分野がこれから研究やイノベーションの世界に参入しようとする若い世代を惹きつけられ

願うばかりである。令和5年に「インフラ物性研究機構」が設立された。本研究機構がインフラ物性学の研究・実験テーマの発掘、成果の技術基準化・標準化に必要な知見、インフラ物性学の発展と体系化を目指したプラットフォームとして発展することを願っている。

5. おわりに

デジタル化社会において、インフラの計画、設計、施工、維持・管理の各ステージにおいて作成される情報が包括的に利用されるような環境づくりが求められている。DAMは、このような情報フローの最後の部分を担う活動である。計画、設計、施工の段階で作成された情報と維持・管理の段階で発生した情報を長期にわたって活用し、アセットマネジメントの高度化を達成することが求められる。

情報はフローとして流れて役に立つ。しかし、インフラのライフサイクルを通じて発生する情報過程では、情報を作成する主体と情報を利用する主体が異なるという本質的な問題がある。情報を利用する主体にとって、いくら膨大な情報が存在していても、役に立たない情報は結果として役に立たない。情報フローの上流側の主体がデータをデジタル化しない限り、デジタル化は進展しない。その一方で、あるべきデータの様式やモード、コンテンツの内容や解像度は、データを利用する下流側のニーズにより規定される。このような上流・下流側のデジタル化のモチベーションや全体のデジタル化の進捗を管理することもDAMの重要な課題であることを最後に指摘しておきたい。