

# デジタル・アセットマネジメント

京都大学名誉教授・同経営管理大学院特任教授 小林 潔司

## 1. はじめに

老朽化が進むインフラを適切に管理する方法論として、アセットマネジメントが提唱されて久しい。目視点検等を通じて膨大な点検データが蓄積されてきた。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 ISO55001 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できあがった。

一方、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開発も進んでいる。ドローンやレーザーを用いた計測技術、3次元 CAD 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味を帯びてきた。都市空間や建築物・インフラのデジタルツインが構築されている。BIM/CIM もその1つである。

BIM/CIM は、計画・調査・設計段階から3次元モデルを導入し、その後の施工、維持・管理の各段階も含めて一連の建設生産・管理システムの効率化・高度化を目指している。たしかに、BIM/CIM の導入により、これまで2次元上の図面を3次元上に展開することにより、対象物の姿をわかりやすく表現できるようになった。しかし、このような技術によりインフラの計画・設計・施工・マネジメントの方法論が変わったということは寡聞にして知らない。

デジタル時代の新しいアセットマネジメント(デジタル・アセットマネジメントと呼ぶ)に関する研究や実践はほとんど蓄積されていないのが現状である。デジタル・アセットマネジメントに関する研究は緒についたばかりであるが、本稿ではデジタル・アセットマネジメントが目指すべき方向性について、いくつかの試論を展開したい。

## 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。もはや、日本列島の実寸大の双子をサイバー空間上に再現することも可能である。もともとデジタルツインは製造業の世界で生まれた考え方である。デジタルツインとは、「物理空間にある製品の稼働状況、環境情報等をリアルタイムで収集する一方、サイバー空間上に構築された製品モデルを用いてシミュレーションを実施することで、設計の改善や環境に応じた動作指示、故障予測等を可能にするソリューション」であるとされる。

製造業のデジタルツインと異なり、インフラ施設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とおりに建設されている保証はない。施工が終了した時点でインフラの品質には多大な不確実性が介在する。さらに、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どこにもない。したがって、デジタルツインが、インフラマネジメントにとって必要となるすべての情報を提供す

ることは不可能である。計画・設計・施工・マネジメントと続くインフラマネジメントの各段階において必要な情報をそのつど追加していくことが不可欠となる。それだけに、インフラを表現するサイバー空間の構成が複雑になる。

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システムをデジタル・アセットマネジメント（DAM: Digital Asset Management）システムと呼ぼう。図-1に示すようにサイバー空間における DAM システムは、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。ただし、上述したように、それが現実のインフラを表現している保証はない。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る。この場合、デジタルツインはデータが観測された時点におけるインフラの姿を表現している。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併せ持つことになる。時間とともにインフラの劣化が進展していく。このため、時間を通じてインフラの性能が一定である保証はない。図-2に示すように、3次元空間で構築された DAM システムを4次元空間上に展開することにより、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る。

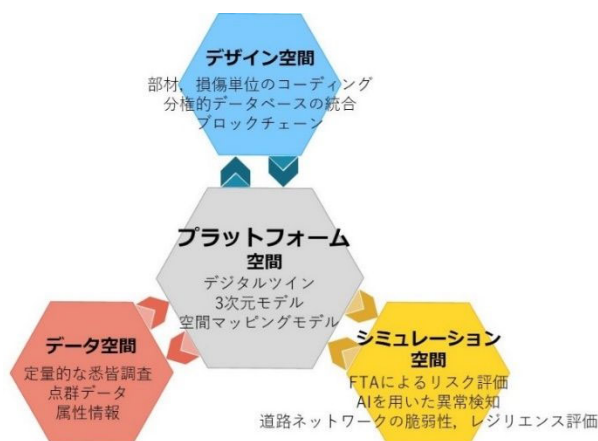


図-1 DAM システムのサーバー空間構成

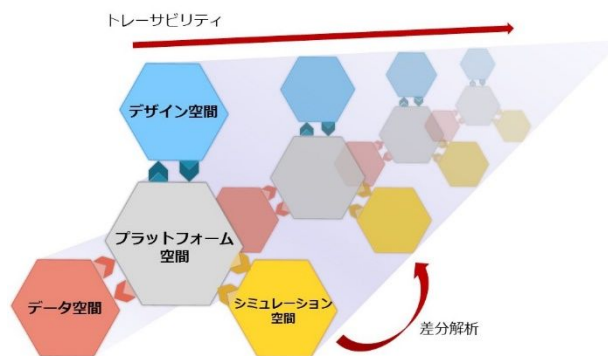


図-2 DAM システムの 4 次元表現

### 3. デジタル・アセットマネジメントの価値

ICT 技術や AI 技術の発展により、インフラのモニタリングや計測結果の可視化技術は著しく進歩しつつある。デジタル・アセットマネジメント時代においても ISO55000 シリーズに基づくアセットマネジメントの基本的な方法論が変化するわけではない。しかし、デジタル技術を用いて、(1)想定外への対応、(2)網羅性の確保、(3)可能性の評価、(4)組織の変革という 4 つの点でアセットマネジメントの高度化をなしうると考える。デジタル技術でなしうるアセットマネジメント技術の開発は緒についたばかりであるが、以下では著者らが開発した要素技術の一端を紹介したい。

#### (1) 想定外への対応

計測には、理論・経験に基づく計測とそれに基づかない計測の 2 種類がある。目視点検による方法は前者である。その品質は、点検者が有する理論・経験に依存する。デジタル・アセットマネジメントにおいても目視点検の重要性に変わりない。しかし、目視点検は変状や損傷の検出に留まり、構造物の経年的変位を把握できない。一方、レーザー計測等は理論・経験に基づかないが、逆に変化の状況をありのままに検出できる。

図-3 に示すように、複数時間断面の計測結果を比較することにより、目視点検では認知できない構造物の経年的変位を検出できる。過去に生じたことのない想定外の事象や災害により発生した異常の検知に重要な役割を果たすことになる。インフラの維持補修だけでなく、防災マネジメントも含めてデジタル・アセットマネジメントを実施するためには、継続的に点群データを計測しておくことが重要である。

点群データはそのままでは点の集合で、構造物として識別されない。このため、2 つの時間の間で、構造物に発生した変位を認知するためには、点群と構造物を対応させるためのターゲットシステムを整備することが必要となる。さらに、構造物に発生した変位を検出するためには、2 つの時間断面におけるターゲットの座標値の差分を評価することが必要である。

計測した差分は相対的な評価値にすぎず、差分値を変位として解釈するためには、評価の基準となる座標値を決定しておくことが必要となる。点群データが有する座標値としては、①設計上の座標値 (as designed value)、②現状の座標値 (as is value)、③管理上の目標となる座標値 (ought to be value) 等が考えられる。MMS (Mobile Mapping System) 等で計

測される座標値は現状の座標値にすぎない。もちろん，異なる時間断面で計測した現状の座標値を用いて差分を計算することができるが，それを変位として評価するためには，設計上の座標値，もしくは目標となる座標値との乖離情報を用いて差分値に管理上の意味を検討することが不可欠となる。近年の計測技術の発展を考えれば，異なる時点において利用可能な計測技術の精度が異なることが起こりえる。また，機種・機器による系統誤差も起こりうる。差分解析を実用化するためには，さまざまな理由が原因となって発生する誤差の補正を行う AI の開発が前提となろう。

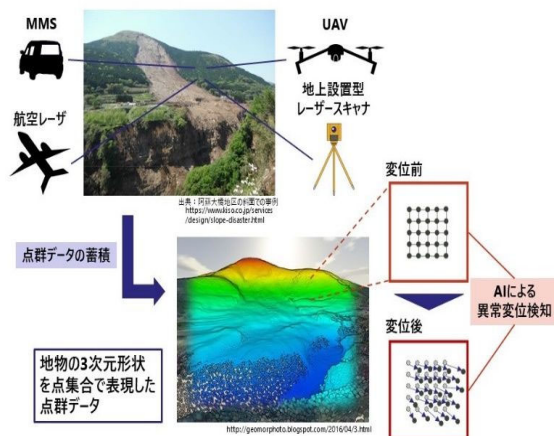


図-3 点群データによる異時点差分分析

## (2) 網羅性の確保

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。予防修繕においては，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ない。このようなニーズを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。デジタルツインを用いれば，バーチャル空間上に3次元的に表現された対象物上に，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。現在，3次元的に表現された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・集計化する方法をシステム化することが望ましい。

アセットマネジメントに関わる多様な管理者や技術者が，3次元プラットフォーム空間を利用することを考えれば，3次元プラットフォームと利用者との双方向のコミュニケーションを達成するような関係性を構築することが必要となる。例えば，点検技術者が，

個人の経験や知見を用いて見出した発見的情報を，作業用の3次元プラットフォームに書き込めるような方法論が有効であろう．対象物の中で目視点検できない箇所が存在すれば，ドローン，センサーや非破壊試験等，目視点検に替わる方法を検討する必要がある．デジタル・アセットマネジメントでは対象物の中で，代替的方法により点検すべき箇所を3次元プラットフォーム上に可視化することができる．

#### 4. 可能性の評価

インフラの中で計測が容易ではない部材・部位が存在する．そのような箇所も含めて重点的にモニタリングすべき箇所を事前に認識しておくことが必要である．プロフェッショナルによる技術判断の結果，構造的に重要な要点検箇所をデジタルツイン上に明記しておくことも可能である．デジタル・アセットマネジメントでは，起こりえることをシミュレーションにより分析することが可能となる．図-4はフォールトツリーを用いて部材・部位の損傷が構造物全体に及ぼす影響を分析した結果を示している．仮想的に部材・部位に損傷が発生したことを想定し，その損傷が構造物全体に及ぼす影響をシミュレーションしておく．このような分析を通じて，重点的にモニタリングすべき部材・部位を特定できる．構造安全上，クリティカルな部材・部位が存在する場合，目視点検が容易でなくても，非破壊検査等，代替的な方法によるモニタリングが必要となる．シミュレーション空間では，可能性のあるリスクを検出し，それをマネジメントプロセスに反映させることが可能となる．

さらに，構造物の動的応答性能や耐荷性能をより深く評価するためには，有限要素法等を用いた数値解析やシミュレーション等が必要な場合もある．シミュレーションを実施するためには，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．この場合，性能評価の対象となるインフラをどのように定義するのが問題となる．設計されたインフラを対象とする場合，デザイン空間に保管されたデータを用いることになる．供用後，一定程度の時間を経過した現時点におけるインフラを対象とする場合，データ空間に蓄積されたデータを利用することになる．このような数値解析やシミュレーションは，図-1に示すシミュレーション空間で実施されることになるが，デジタルツインを介在して対象物の離散的表現化を実施するためのインターフェイスの設計が不可欠となる．

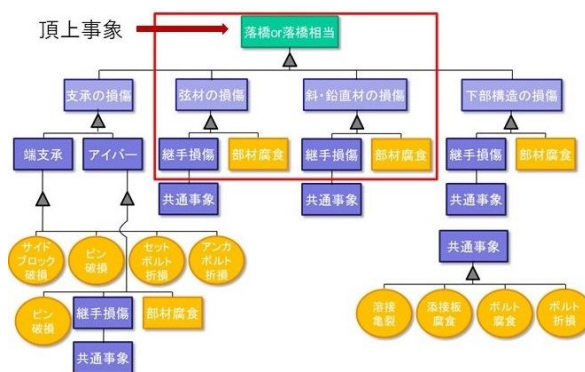


図-4 フォールトツリーによる損傷分析

## (1) 組織の変革

アセットマネジメントを実施する組織は、分野や意思決定レベルが異なるさまざまな人間によって構成される集合体である場合が多い。インフラ管理主体がアセットマネジメントを適正かつ効率的に遂行するためには、アセットマネジメント情報の識別、収集、処理及び伝達が円滑に行われることが不可欠である。組織の中で共有されるべき情報としては、例えば点検業務やモニタリング結果等、組織内で作成された情報だけでなく、組織外から得られる利用者やステークホルダーの意見、経済状況や規制等に関する情報も含まれる。伝達は、通常、確立された指示命令経路及び報告経路によって行われるが、文書によるもののほか、会議、打合せ等の口頭による情報交換等も含まれる。最近では円滑な情報伝達のために、組織内のデジタルイゼーション、デジタルトランスフォーメーションの重要性が指摘されるようになっている。

海外のように、実務者の転職と新規雇用による補充が常態化されているアセットマネジメント業務の雇用環境においては、アセットマネジメントの実務において現場の維持・補修業務の手順や方法が安定して運用されるようにマニュアルとして体系化されている。しかしながら、現場における実務者の技能や技術を重要視するわが国においては、属人的要素を排除した安定したアセットマネジメント実務の体系化が十分に行われていない。その改善とともに、トップダウン的視点とボトムアップ的視点の双方を考慮した統合的マネジメントの方法論を開発することが必要となる。

道路インフラのアセットマネジメントにロジックモデル<sup>2)</sup>を適用した事例研究として「阪神高速ロジックモデル (HELM) <sup>3)</sup>」の例がある。ここでは、図-5に示すように、最終アウトカム、中間アウトカム、中間アウトカム指標、アウトプット、インプットで構成される樹形図を作成している。アセットマネジメントを実施するためには、アセットのパフォーマンスとその経年的変化を記述するためのデータベースの体系化・整備が前提となる。さらに、アセットマネジメントの計画・運用を経て、そのパフォーマンスを評価するためには、アセットマネジメントシステムを支援するようなアセットマネジメント情報システムの整備が不可欠である。ここでは、アセットマネジメントを実施するために用いるマニュアル、規則・ルールや様々な申し合わせ事項、さらには過去に実施した調査研究等の資料を体系化したような情報システムを構築することが必要となる。このような情報システムは、企業や組織が保有するアセットマネジメント技術を集大成したものである。ロジック

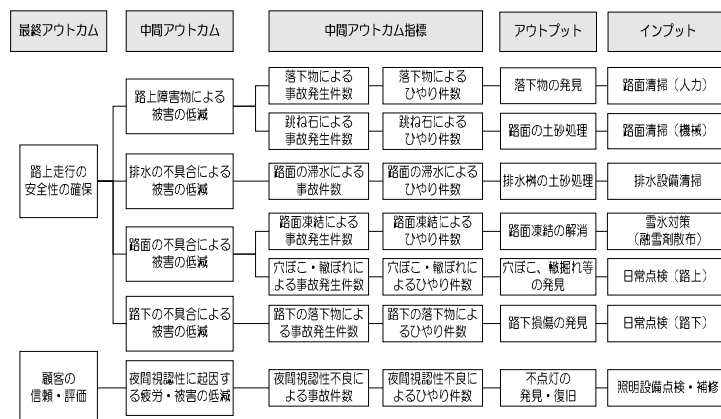


図-5 阪神高速ロジックモデル (一部)

モデルは、インフラ資産価値を増大するという視点から、ともすれば散逸する可能性がある組織内の情報、データベース、組織が有する技術を、アウトカム、アウトプット、インプットというレベルに従って体系的に整理したモデルである。このとき、インフラ資産評価の目的は、インフラ資産価値の増大という観点から、組織が有する技術・情報体系を継続的に改善していくという知識マネジメントを実施させることにほかならない。

## 5. インフラ物性学

気候変動に対応するためのインフラ・カーボンニュートラル技術、インフラ・リサイクル技術、多発する災害に対応する高度化した都市の強靱化のためのインフラ・レジリエンス技術の発展が求められる。このような技術的課題に応えるためには、インフラの劣化状態に対応した維持・補修方法のみならず、ミクロな物性レベルでの課題に対応した新素材の開発、新工法の開発等を推進していくことが必要である。インフラの劣化過程に関する点検・モニタリング、力学的劣化機構の解明、劣化現象の力学的・統計的モデル化等を含むアセットマネジメント技術は長足の進歩を遂げたものの、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、ほとんど研究事例や実務的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) やスーパーコンピュータを活用した物性科学の進展により、微視的 3D 画像から数値解析用モデルへの展開、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、インフラ分野における新素材や新材料に関わるイノベーションを実施していくことが可能になってきた。SPring-8 とは大型放射光施設であり（現在、Spring-8-II へのバージョンアップが計画されている）、電子を加速・貯蔵するための加速器群と発生した放射光を利用するための実験施設及び各種付属施設で構成される。放射光とは光速に近い速度で直進する電子が、その進行方向を磁石等によって変えられた際に発生する電磁波のことである。SPring-8 を活用し、太陽の 100 億倍の明るさを持つ放射光を使ってインフラのミクロな物性レベルの構造や機能に関する超ビッグデータを取得することが可能となる。SPring-8 を用いて劣化したコンクリート供試体の粒子レベルの断層画像を構成した結果を図-6 に示している。現在、舗装、コンクリート、土構造物の供試体の断層画像のデータベースの作成が試みられている。

SPring-8 により計測されたデータ量は膨大な量に及ぶため供試体の 3 次元断層画像をイメージプロセッシングする技術が必要となる。それにより破壊された骨材、複数の空隙を繋

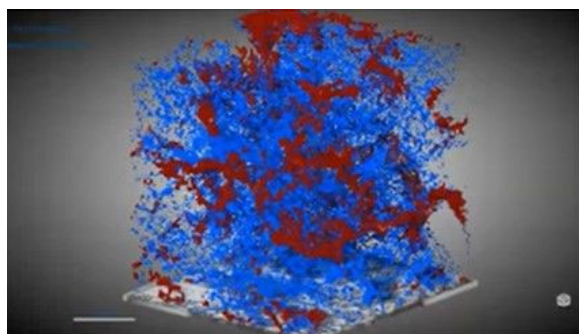


図-6 コンクリート空隙の断層画像

げたび割れを可視化できるようになる。現時点では海外のソフトウェアに頼らざるを得ないがオート・エンコーダー等の AI を駆使した画像構成技術の発展が望まれる。

インフラ物性学の発展のためには、インフラ特性の可視化を越えて、インフラ物性の 3 次元特性を計量化する画像解析技術が不可欠である。物性画像解析の世界は 3 次元空間における物性特性を克明に表現するところから始まる。このような画像解析のために、位相的データ解析という手法が開発されている。位相的データ解析を用いたインフラ物性研究のポテンシャルはすでに整っていると考えた方がいい。位相の定義には多様性があるけれど（例えば距離という）位相の包含関係により、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。インフラの新素材や新工法の性能規定のために重要な基礎研究になるだろう。

インフラの新素材、新工法の性能評価を行うために、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、例えば伝統的な有限要素法等の計算手法が活用できる。問題はその後である。このような相互作用は物性構造そのものを変化させる。化学反応によるインフラ物性の変化も発生するだろう。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。問題は計算量である。AI を内蔵したようなシミュレーションが必要になるだろう。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。

インフラ物性学の研究は緒についたばかりである。なによりも、イノベーションを推進する人材がほとんどいない。インフラ物性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ねばと願うばかりである。

## 6. 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。デジタル・アセットマネジメントは、このような情報フローの最後の部分を担う活動である。そこでは、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、情報を作成する事業者と情報を利用する事業者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、いくら膨大な情報源が存在していても、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事業者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デジタル・アセットマネジメントの重要な課題であることを最後に指摘しておきたい。

<参考文献>

- 1) 小林潔司編著，中谷昌一，玉越隆史，青木一也，竹末直樹共著：実践 道路アセットマネジメント入門，コロナ社，2019.
- 2) Hatry, H. P.: *Performance Measurement; Getting Results*, Urban Institute Press,2001,上野宏・上野真城子訳:政策評価入門 結果重視の業績測定，東洋経済新報社，2004.
- 3) 坂井康人，上塚晴彦，小林潔司：ロジックモデル（HELM）に基づく高速道路維持管理業務のリスク適正化，建設マネジメント研究論文集，Vol.14,pp.125-134,2007.