招待論文

サイバーインフラストラクチャ構築による価値創造に向けて

TOWARD VALUE CREATION BY DEVELOPING CYBER-INFRASTRUCTURES

矢吹信喜

Nobuyoshi YABUKI

正会員 Ph. D. 室蘭工業大学助教授 工学部建設システム工学科
(〒050-8585 北海道室蘭市水元町 27-1, yabuki@news3.ce.muroran-it.ac.jp)**Key Words :** cyber-infrastructure, data model, product model, virtual reality, sensor network, RFID, value

土木分野は、建設投資額減少という厳しい環境の中、膨大な量の既設の社会基盤施設の供用と維持管理をしていく必要がある。本論では、将来にわたって土木分野が成長し発展できるよう、社会基盤施設を対象としたインターネットや各種情報技術による仮想的な情報世界であるサイバーインフラストラクチャの構築を提案した。これを構築するために必要な要素的情報技術として、データモデル、マンマシンインターフェース、マルチエージェントについて概説した。また、サイバーインフラストラクチャと現実の社会基盤施設を結びつけるための要素的技術として、IC タグ、センサーネットワーク、現実世界への情報伝達について述べた。さらに、提案したシステムにより将来、社会基盤施設から価値を創造する一つの方法について論じた。

1. はじめに

土木技術は、これまでに膨大な量の交通施設、河川・港湾構造物、エネルギー・通信施設等の社会資本を建設することによって、社会に大きく貢献してきている。土木工学は、こうした社会資本を計画、設計、施工、維持管理するために必要な各種の技術を提供し、重要な役割を演じている。

一方、情報技術 (IT) はここ 20 年程の間に長足の進歩を遂げ、産業界のみならず社会にも大きな影響を与えている。最近では、高性能で安価なパソコン、PDA (携帯情報端末)、携帯電話等が普及し、ほぼどこでもインターネットにつながり、遠方の人々や組織と情報のやりとりや共有が可能になった。また、3次元 CAD や CG (コンピュータグラフィックス) と各種解析ソフトウェアにより臨場感あるシミュレーションを比較的容易に作成できるようになった。こうした情報技術の進化により、以前は SF 小説や映画で描かれていたサイバーワールド (サイバースペースとも言う) と呼ばれる仮想現実の情報世界が形成されてきている。サイバーワールドでは、情報が遍く広がり、組織や個人のフラット化、NPO (非営利組織) 等の小組織の台頭、勤務地の自由選択、国際的分散処理化等が起こり、仕事のやり方も大きく変化しつつある。また、小型の IC (集積回路) や MPU (マイクロプロセッサ) 等を内蔵した機器類が至る所に配置されたユビキタス社会や、高密度なセンサーネットワークを配置したユビキタスセンサーネットワーク社会の実現性

が高くなっている。その影響の大きさから、農業革命、産業革命に続く 3 番目の革命である情報革命すなわち「第三の波」¹⁾ の到来と言われている。

土木分野でも数値解析や文書・CAD 図面作成等への IT 利用は以前から活発であり、一部の研究者達は先進的な IT 利用に関する研究を行っている。しかしながら、情報革命が将来与えると予想されるインパクトの大きさを考慮すると、全体的には余り活発に研究開発されているとはいえないように見受けられる。近年、日本における建設投資額は減少傾向にあり、受発注に伴う不祥事、環境問題、若者離れ等から、土木分野を取り巻く環境は非常に厳しいといわざるを得ない。今後も日本国内の建設投資額は減少していくと予想される中、戦後建設された膨大な量の社会資本を維持管理しながら、国民へサービスを提供していく必要がある。

こうした問題を解決するためには、従来の技術開発による方法やマネジメントによる方法が考えられるが、情報技術による方法も大いに将来性があると期待される場所である。特に、サイバーワールドでは土木構造物や都市・自然空間をコンピュータ上に表現し、様々なシミュレーションを行い、センサーデータや情報を一般に公開することにより共有し、オープンな議論をすることができ、魅力的である。こうしたサイバーワールドは、土木構造物の計画、設計、施工、維持管理の効率化を図るとともに、利用者等への情報提供や各種支援も行う情報基盤になり得ると考えられる。そこで、本研究では、土木分野のサイバーワール

ドを支える基盤を「サイバーインフラストラクチャ」と呼ぶこととする。

一方、土木構造物等の社会基盤施設は現実世界のもの、すなわち実社会基盤であるから、サイバーインフラストラクチャの情報がテレビゲームのように現実から遊離したものでは意味がない。そこで、測量、センサーネットワークやICタグ（RFID: Radio Frequency Identification）等によって、サイバーインフラストラクチャと実社会基盤を融合することが重要だと考えられる。さらに、サイバーインフラストラクチャから実社会基盤の人々や機器類等に指令や支援といった各種情報を与えることにより、全体として安全・安心で快適な社会や経済発展につながり、実社会基盤がその価値を向上あるいは創造することが可能になると予想される。新規の建設工事額が減少する中、サイバーインフラストラクチャにより既存の社会基盤に新しい価値を創造させることが、土木技術が将来生き残り、繁栄していくための重要な一つの手段であると筆者は考えている。本論では、そのために必要な要素的な情報技術について論じ、価値創造の将来像を展望する。

2. システムアーキテクチャ

サイバーインフラストラクチャは、コンピュータのハードウェアとソフトウェアがインターネット上でつながった、土木分野を対象とした仮想現実的な情報世界の基盤である。その中核となるのは構造物や構造物に関連する種々のデータを蓄えるデータベース、およびユーザーがデータを処理したり、設計、解析、施工計画を立てたりするためのソフトウェア群である。ソフトウェアとしては、CAD/CG、GIS、設計計算、有限要素解析、その他の解析、施工計画といった土木専門用のものの他、通常の文書作成、表計算、電子メール、データベースのソフトウェアが含まれる。ユーザーは、サイバーインフラストラクチャの中で、何らかの情報を認知、予測、計画、意思決定、行動を取る。

しかし、構造物や現場は実物であるから、情報を実際のモノから遊離させないために、構造物の部材や機器類に多数のICタグを設置し、ユニークなID番号によって、仮想的な情報世界のデータと実物をリンクさせる。また、測量により構造物の寸法等を、試験、計測等により各種属性を求めると同時に、センサーネットワークを実社会基盤に配置することにより、現実世界のデータを仮想世界に入力する。こうした外部と内部のデータと各種ソフトウェアおよびユーザー間のコミュニケーションによって、何らかの意思決定に基

図-1 システムアーキテクチャの概念図

づいて、仮想世界から現実世界の構造物、機器類や人々へ指令、アドバイスあるいは支援といった情報が投げかけられる。こうした入力と出力によって、サイバーインフラストラクチャと実社会基盤の間には密な関係が構築され、互いに融合した状態になることが必要である。図-1 にシステムアーキテクチャを示す。

このようなシステムは、現在でも似たようなものは存在するが、いくつかの点で本論が目指しているシステムとは大きく異なる。まず、構造物のデータに関しては、特定のソフトウェアに依存した形ではなく、一般化された仕様に基づくプロダクトモデルデータであり、2次元の図面データではなく3次元データが基本となる。

次に、既に多くのセンサー類（温度、湿度、雨量、風速、震度、加速度、レーダー、水位、波高、カメラ、ビデオカメラ等）が社会資本施設に設置され、その情報をもとに、交通の流れを改善したり、防災や構造物の運用の効率化に役立てられている。しかし、本論で提案するのは、現在のようなセンサーの量のレベルではなく、はるかに高密度で国土全体を覆うような膨大な量のセンサーを設置することを前提としている。特に橋梁やダムなどの重要構造物には集中的にセンサーを設置し、センサークラスタを形成する。センサークラスタ間、すなわち道路や河川にもその周辺を含めて面的にセンサーを配置し、センサーネットワークを形成する。このような高密度なセンサーネットワーク構築構想は、特に新しいものではなく、既に総務省が「ユビキタスセンサーネットワーク」実現に向けて、調査研究²⁾を実施している。そのアプリケーションの中には、防災・災害対策、環境保全、交通、構造

物管理等、土木分野に関係するものが含まれている。

こうした膨大な数のセンサーを設置すると、膨大な量のデータが刻一刻と発生する。すると、従来のような方法では、データを貯蔵し、上手に利用することは困難となる。そこで、最新かつ高度な情報通信技術が必要となる。本論では、まず、サイバーインフラストラクチャを構築するための要素となる技術の中で、特に筆者らが現在研究開発を進めている以下の3個の要素的情報技術について概説する。

- データモデル
- マンマシンインターフェース
- マルチエージェント

次に、サイバーインフラストラクチャと現実世界をつなぐための要素技術として、

- ICタグ
- センサーネットワーク
- 現実世界への情報伝達

の3個について概説する。

3. サイバーインフラストラクチャの要素的情報技術

(1) データモデル

サイバーインフラストラクチャで最も重要なものはデータである。土木分野で扱うデータは多岐にわたるが、構造物データ、地理情報、その他のデータに、大きく分類できると考えられる。これまでは、構造物データは、図面データ、諸元データ等に分類され、それぞれのデータモデルが各機関、組織、企業等により策定されてきた。地理情報については、地図のデータモデルが構築されてきた。その他のデータ、例えば、センサーによるモニタリングデータは、センサーごと、機関ごとあるいはメーカーごとにデータモデルが構築されてきた。

しかし、これでは種々のデータを複数の異なるシステムや組織間でやり取りしたり、共有したり、あるいは後に再利用するためには、膨大で複雑なデータ交換のためのコンバータプログラムを開発する必要があり効率的ではない。一方、全てに統一的なデータモデルを強制するのも余り現実的とは言えない。現実的なのは、データ共有することを前提に、数学的にしっかりした理論に基づいたいくつかの標準的なデータモデルを各分野で適切に選択し、貯蔵した様々なデータをなるべく少ない労力でデータ交換し処理することである。

そのための代表的なデータモデルとしては、表形式で表現できる関係（リレーショナル）データモデルとオブジェクト指向技術によるオブジェクトデータモデ

ルが挙げられる。関係データモデルは、歴史も長く、集合論等の離散数学に基礎を置くもので、実際のデータを貯蔵し処理するための言語であるSQL（Structured Query Language）やデータベースマネジメントシステム（DBMS）もかなり標準化されている。2次元の表形式で表現可能なデータであれば、関係データモデルを選択するのが妥当である。一方、構造物を表現するデータモデルとしては、従来の2次元のCAD図面があるが、図面は人間にはわかりやすいが、コンピュータにとっては線や円等の図形データの集合であり、構造物に関するデータを自動的に共有していくことは困難である。そこで、構造物を構成する部材や要素等をオブジェクト（モノ）として捉えるオブジェクトデータモデルが適切な選択となる。このモデルでは、オブジェクトを抽象化したクラスを階層的に配置し、各クラスには属性情報と関連するプログラム（メソッド）を持たせることができる。コンピュータに実装するための言語としては、UML（Unified Modeling Language）、EXPRESS等があるが、最近では融通が利くXML（Extensible Markup Language）が使用されることが多い。

a) 構造物データ

構造物に関する情報モデルは、プロダクトモデルと呼ばれる。プロダクトモデルは製造業が中心となっており、オブジェクト指向技術に基づいて構築しているデータモデルである。製造業では3次元形状が表現できるプロダクトモデルが構築されている。建築構造物については、業界団体であるIAI（International Alliance for Interoperability）が3次元プロダクトモデルであるIFC（Industry Foundation Classes）の開発および普及活動を行っている。IFCは建築分野ではデファクトスタンダードになっている。一方、土木構造物については、CALS/ECにおいて2次元CAD図面の標準化により電子納品がされるようになった。また、市販の鋼橋の設計製作支援システム等では、特定のCADに依存した3次元データモデルは構築されているものの、3次元プロダクトモデルの公開された標準の開発はあまり進んでいない。

そこで、筆者らはIFCを元にプレストレストコンクリート（PC）橋の3次元プロダクトモデルを開発し、3次元CADシステム、設計計算システム、構造細目照査プログラム等との間でデータ相互運用が図れることを実証した³⁾（図-2）。さらに、鋼桁橋についてもIFCを元にプロダクトモデルを開発している⁴⁾（図-3）。同時期に、IAIフランス支部ではSETRA（道路および高速道路技術研究センター）とCSTB（建築研究所）が中心に同様なアプローチで橋梁プロダクトモデルを構築し、IFC-BRIDGEと名づけIAIに認定

(a) PC 橋梁の 3 次元 CAD モデル (同時にプロダクトモデルデータが生成される)

(c) 鉄筋, PC 鋼線, シース等の干渉チェック

(b) PC 橋梁のプロダクトモデルから自動的に抽出された構造設計ソフトウェアへの入力データ

(d) 鉄筋のかぶりのチェック

図-2 PC 橋梁のプロダクトモデルの応用事例

図-3 鋼桁橋のプロダクトモデルを 3 次元 CAD で表現した事例

させていた。そこで、筆者らはフランスのグループと IFC-BRIDGE を共同開発することとし、現在実施中である⁵⁾。このプロダクトモデルによって作成される実際の橋梁のデータは、特定のアプリケーションプログラムに依存せず、全てテキストファイルで表現されるので、コンバータプログラムを開発することにより、3 次元 CAD、設計計算ソフトウェア、構造解析ソフトウェア、工程管理ソフトウェア等とのデータ共有が自動的に可能である。

道路や地形、地盤を表現する 3 次元プロダクトモデルは、各国で開発が進められているが、オープンコンソーシアムである LandXML.org が開発している LandXML が比較的多くのユーザーに使用されている。筆者らも LandXML を利用して、切土盛土の土工シミュレーションのプロトタイプシステムを開発した⁶⁾(図-4)。その他には、道路の基本骨組構造 (スケ

図-4 3次元CADで表示したLandXMLによる地形モデル

ルトン)とLandXMLを利用した出来形管理技術⁷⁾, 日本道路公団のJHDM (Japan Highway Data Model)⁸⁾, 道路線形を用いた道路設計情報モデル⁹⁾等も提案されている。

プロダクトモデルは、狭義には製品や構造物そのもののデータに関する仕様であるが、広義にはプロジェクト全体、構造物等の施工するプロセス、設計・施工等を行う組織や人々等多数の情報を包含するモデルとして捉えられ、開発が進められており、研究対象は豊富にあると考えられる。

b) 地理情報

地理情報については、ISO (国際標準化機構)/TC (専門委員会) 211が地理情報に関する国際規格 (ISO 19100 シリーズ) の作成作業を進めている。日本国内では、地理情報標準やJPGIS (Japan Profile for Geographic Information Standards) の作成を行っている。また、国土院では電子国土Webシステムをインターネットで公開しており、国や地方自治体等が防災、観光、環境等さまざまな目的で利用している¹⁰⁾。コンピュータへの実装には多くの市販のGIS (Geographic Information System) がある。

c) その他のデータ

その他のデータとしては、写真やビデオ画像、測量データ等を含めた広い意味のセンサー関連データが、サイバーインフラストラクチャでは相当量となると考えられる。センサー関連データについては、データモデルの標準化はほとんどされておらず、各メーカー、機関、組織により独自なものとなっている。これでは、せっかくコンピュータがインターネットによりつながっても、データの相互運用や共有化が進みにくい。そこで、筆者らは以前XMLを用いて地震観測データの共通フォーマットに関する提案を行い、事例として防災科学技術研究所のK-Netのデータを、イン

図-5 地震観測データ共有システム

ターネット上でスペクトル解析やGISソフトと共有できるプロトタイプシステムを開発した¹¹⁾ (図-5)。

米国では、地震・耐震工学を研究する大学と研究所で互いにデータを共有し、遠隔にある複数のサイトの耐震実験や数値解析を連携させるコラボレータであるNEES (Network for Earthquake Engineering Simulation) gridが設立され、現在はNEESitとして研究活動を行っている。振動台実験や遠心模型実験等の実験データと解析データを共有するためのデータモデルが、スタンフォード大学で開発された¹²⁾。このモデルは、オブジェクト指向によるものと関係データベースによる2つのモデルで構成されている。一方、日本の防災科学技術研究所の超大型振動台E-Defenseの実験データも実験終了後一定期間を過ぎるとインターネットを介して、EDgrid¹³⁾として一般に公開することになっており、米国のNEESitと相互にデータの共有を図るべく、日米共同でデータモデルの開発を行っている¹⁴⁾。

多岐にわたる膨大なセンサーを実際の社会基盤施設に今後設置していけば、膨大な量のデータが発生する。数学に立脚し曖昧さをできるだけ排除したデータモデルを開発し、標準化を進めていかないと、貴重なデータが有効に利用されず、捨てられるか無為に貯蔵されることになってしまう。共有と再利用が容易な方法で、なおかつ一般的で汎用性を有するデータモデルを構築していく必要がある。

(2) マンマシンインターフェース

ユーザーがデータを見るためには、何らかの可視化システムが必要である。構造物データに関しては、2次元図面のような専門家が見てわかりやすい表現と一般の人々が見て理解しやすい3次元CGの表現が可能なシステムが望ましい。特に、ユーザーが立体視により仮想空間の中に入り込んだような没入感が得られるバーチャルリアリティ (VR) を利用することが今後益々必要になろう。筆者らは以前より、現状の3次元

図-6 VRを利用した鋼橋の設計システム

CADシステムにおいては、扱うデータは3次元であるが、ユーザーに見せる際は平面的なディスプレイ上に構造物モデルを表示しているため、構造物が複雑になると3次元空間の中でオブジェクトの位置を捉えることが困難になるという問題点を指摘している。そこで、左右眼に異なる画像を見せることによる3次元立体視が可能で、仮想3次元空間内を自由に移動したり構造物の部材モデルを操作できるシステムを開発している¹⁴⁾(図-6)。立体視するための技術としては、液晶シャッター付き眼鏡と赤外線エミッタによる方法、ヘッドマウントディスプレイによる方法、特殊な液晶ディスプレイによる裸眼立体視等の方法がある(写真-1)。仮想3次元空間内で自分の視点を移動させるためには、マウスによる操作のみならず、磁界をユーザーの周りに発生させ、ユーザーの頭や眼鏡に磁気センサーを取り付けて、視点の移動をリアルタイムに可視化システムに反映させる方法を採用している。

また、構造物や部材を移動させたり、新しい部材を加えたりする操作を行う際、現在の3次元CADシステムで使用されているマウスとキーボードによる方法では困難を感じることが多い。これは、3次元空間内を2次元空間で操作しているからだと考えられる。そこで、実際に手に持って自由に移動できる「タンジブル」な(触ることができる)ユーザーインターフェース¹⁵⁾が有効になる。筆者らは、オーグメンテッドリアリティ(AR)あるいはミクストリアリティ(MR)と呼ばれる技術を用いて、タンジブルで使いやすい3次元VR-CADシステムの開発を行っている。具体的には、写真-2に示すように、印を付けた物体を手を持ち、パソコンにつながった小型のビデオカメラで上部から撮影すると、ディスプレイ上では物体が

予め登録しておいた鋼桁やプレキャストコンクリート部材といった別のCGオブジェクトとして映されるのである。この技術により、3次元CAD空間の中で部材オブジェクトを自由に移動させ、施工性や干渉等のチェックを行うことが可能になると考えられる。

さらに、時間とともに土木構造物や都市・自然環境は変化していく。建設中の構造物の出来型を確認し、EVM(アードバリューマネジメント)¹⁶⁾を用いてコストとスケジュールの両面で問題がないかを確認し、あれば適切な対応案を考え、予測するためには、3次元CADシステムだけでは不十分であり、時間軸を加えた4次元CAD(図-7)が望ましい⁶⁾。

公共的な物である社会資本の設計、施工、維持管理業務においては、異なる専門分野の技術者やステークホルダー達の間でのコミュニケーションと協調(コラボレーション)が重要である。スタンフォード大学では、PCプロジェクトを3台並べて、各スクリーンに連動する異なる3つのアプリケーションシステムの映像を映し、何人かの専門技術者達の協調作業を支援するiRoomを開発し、その効果を検証している¹⁷⁾。将来非常に多くのユーザーがデータを利用し、互いに議論しながら協調的に価値を創造していくためには、分散しているユーザーが同時にかつスムーズに、例えば現場の状況を遠隔にいても確認しながら、話し合えることができるコミュニケーションツールが必要となろう。その際、分散するユーザー、データベース、各種アプリケーションシステム群をつなぎ、データのやり取りができるようにするためには、分散DBMS、ORB(Object Request Broker)、SOAP(Simple Object Access Protocol)といったミドルウェアが重要な役割を演ずることになる。ORBは、異なるコン

(a) 液晶シャッター付き眼鏡と赤外線エミッター

(b) ヘッドマウンテッドディスプレイ

(c) 裸眼立体視が可能な液晶ディスプレイ

写真-1 立体視のための諸技術

ピュータ上にあるプログラム（オブジェクト）間で、データのやり取りをする際に必要となる仲介ソフトウェアである。しかし、ORBは一般に難解であることから、最近ではXMLを使用し容易に動作させることが可能なSOAPに基づいたWebサービスがオブジェクト間のデータのやり取りによく使用されている。

写真-2 タンジブルなユーザーインターフェースを用いたオーグメンテッドリアリティ

(3) マルチエージェント

エージェントとは、1990年頃から情報工学分野において研究され始めたもので、人間が細かく指示しなくても自律的、自発的に動作し、外部環境に適応しながら反応し、システム全体を知ることなく局所的な情報のみで動作する等の特徴を備えた知的なオブジェクト（プログラム）として考えられている。複数のエージェントが相互作用によって集団的に振る舞い、知的な動作をする場合、マルチエージェントと呼ばれる¹⁸⁾。

ユーザーの代理人として、コンピュータやネットワークの中で自律的に動き回り、データを収集したり、センサーデータの閾値との比較をして警報を出したり、システム状況の変化に応じて各種処理を行うエージェント群（マルチエージェント）が重要である。サイバーインフラストラクチャでは、種々のアプリケーションシステムが使用され、プロダクトモデルに基づいたコンバータプログラムによりデータを相互運用したり、共有する。例えば、3次元CADシステムを使用して鉄筋コンクリート構造物の設計をしている際、部材の干渉チェック、鉄筋のかぶりのチェックおよび鉄筋のスペースのチェックを行うプログラムがエージェントとして背後で自律的に動作し、必要に応じて、干渉や不適切な配筋に対して、ユーザーに教えてくれるようなマルチエージェントは、便利で、設計の作業効率の向上に貢献すると考えられる¹⁹⁾（図-8）。また、設計システムからデータベースシステムへ自動的に検索指令を出して、データを得るエージェント等も有効

図-7 EVMを用いた4次元CADシステム

図-8 マルチエージェントを使用したシステムの事例

である²⁰⁾。一方、マルチエージェントの数が増していくと、互いに矛盾した答えを出してぶつかり合うことが想定される。こうした矛盾を解決するための別のエージェントも必要となる。

また、膨大なデータベースのデータから何らかの意味がありそうな情報や法則性などを発見するデータマイニング機能を持つマルチエージェントは有効だと考えられる。さらに、多くのデータが蓄積すると、過去の類似事例をデータベースから発見し、それを現在の状態に合わせて修正して利用し、その利用事例をまたデータベースに登録する事例ベース推論 (CBR: Case-Based Reasoning) 機能を持ったエージェントも有効だと考えられる²¹⁾。

4. 現実世界とのリンクのための要素的技術

(1) IC タグ

実際の施設や自然環境といった現実世界とデータの仮想空間であるサイバーインフラストラクチャとの間の物理的なリンクは弱い。したがって、現実と情報世界との間に乖離が生じ、工学上の判断や効率的な社会資本の運用や利用を阻害する可能性がある。このギャップを埋めるためのファシリティが必要となる。現実のモノと仮想世界のデータあるいは情報とをリンクするものとして、IC タグが重要な役割を果たすと考えられる。IC タグを現実の構造物の部材や設備に設置し、IC タグの ID 番号と関連するデータベースのデータとをリンクすることにより、現実世界と仮想世界を乖離させず、融合することが可能となる。

IC タグは、メモリを有する IC チップとアンテナを内蔵したタグ (荷札) である。パソコンや PDA 等のコンピュータにつながったリーダー/ライター (Reader/Writer) と呼ばれるコントローラにより、非接触で IC タグ内のデータを読み書きできるものである (図-9)。英語では RFID と呼ばれる。以前から、工場での各種自動化やコンテナ類の管理等に使用されているが、最近、商品につけるバーコードに代わり、サプライチェーンマネジメントを大きく変化させるものとして注目を浴びている。

筆者らは、以前に IC タグを既設構造物の各部材や測定機器類等に貼り付け、IC タグが持つ ID 番号により、リーダー/ライター付きの PDA を携帯する点検員が、点検データを現場で容易に読み書きできるシス

(a) 大型のハンディリーダー/ライターとICタグ

(b) コンパクトフラッシュメモリスロットに差し込むことができるリーダー/ライター付きPDAとICタグ

図-9 ICタグシステムの例

写真-3 点検員がダムの浸透圧データをICタグに読み書きしている

テムを構築し、実際の既設ダムに適用した²²⁾(写真-3)。このICタグシステムにより、PDAの内部にある点検データといういわば仮想情報世界と現実世界であるダムの諸部材や各種測定機器類とのギャップが埋まり、密接にリンクさせることができたのである。また、このシステムでは単にICタグにID番号を入れるだけではなく、点検データや点検員の気づいたこと等の申し送り情報も入れることにより、災害緊急時の

ような場合でも前回の点検データが現場で確認できるようにするとともに、点検員のナレッジマネジメントにも応用できるようにした。

次に、現場では多くの写真を撮影するが、トンネル内部や大型コンクリート構造物の表面等を撮影した場合、後で正確な場所や方向を特定できず、せっかくの写真が利用できないことがある。これも、写真という情報と現場という現実とのリンクが途切れてしまう事例の一つである。筆者らは、現場で写真を撮影する際、ICタグを現場に貼り付け、そのID番号と共に写真に付加すべき属性情報を即座に入力でき、写真とリンクさせるシステムを開発した²³⁾。

最近では、土木分野でもICタグを利用した各種システムが開発され実証試験が行われている。これは、これまでに構築してきた各種情報システムを有効に利用する上で大きな障害となっていた、現場の実際のモノとの乖離を解消し、より一層の価値向上を図ろうとする段階にきているからだと考えられる。

(2) センサーネットワーク

前述のように、既に多くのセンサー類が土木構造物やその周辺自然環境内に設置されているが、次の二つの比較的新しい技術によって、今後センサーの設置や利用に大きな変化を与えられられている。

まず、MEMS (Micro-Electro Mechanical System) と呼ばれる技術によって、加速度や温度等のセンサーを非常に小さなICチップの中に埋め込むことができるようになったことである。これにより、センサー類が小型化するとともに、消費電力が小さくなったことにより、ボタン電池で長期間観測することができるようになった。そこで、ICタグにMEMSセンサーとボタン電池を付加することにより、センサー付きICタグ(写真-4)が利用されるようになった。

次に、アドホックセンサーネットワークと呼ばれる技術によって、小型のMPU、無線機器、アンテナ、MEMSセンサー等によって構成される小型のセンサーノードを複数個、ある程度の距離で配置することにより、システムが自動的に無線によりネットワークを構築し、基地局まで各ノードのデータを送るということができるようになった^{24),25)}(写真-5)。ノード間に遮蔽物が入り、ネットワークが途切れた場合は、別の近くにあるノードを探して、ネットワークを再構築する。従来は、センサーと共にケーブル類を設置しなければならず、コストが高かったが、アドホックセンサーネットワークにより、ケーブルが不要になり、大幅なコストダウンが期待されている。

こうした技術により、今後大量のセンサーネットワークを世の中に張り巡らそうという計画が総務省によ

写真-4 温度センサー付き IC タグ（蓋をはずした状態）

写真-5 アドホックセンサーネットワークシステムの例（左が基地局，下が3個の異なるセンサーノード）

って進められている。これは、現実世界から情報世界への大量のデータの流入を意味する。データをただ垂れ流しにするのか、あるいは、サイバーインフラストラクチャ内で何らかの処理をすることにより、価値ある情報や知識に変えて共有し、さらには現実世界へ意味のある情報として伝達することができるのかは、今後の研究次第である。

（3）現実世界への情報伝達

昔からセンサーによってデータを得て、コンピュータで数値処理し、現実世界に意味のある情報を伝えることにより、ユーザーに利益を与えてきたものの代表的な例が、天気予報や道路の渋滞情報である。しかし、センサーの量が大幅に増え、サイバーインフラストラクチャ内でのデータ解析や知識の再利用等が高度化することにより、現実世界へ伝達される情報の質は大きく向上し、新しい価値を生み出す。例えば、天気予報は昔は、大雑把な予報しかできなかったが、現在

では、ピンポイントで時間帯も細かく予報することが可能になり、そうした情報を必要とするユーザーに対する新しいビジネスを展開するに至っている。

防災分野では、ビルディング、住宅等の建物や細部の地形をもデータ化した仮想都市を対象として、大地震時の動的解析によるシミュレーションや台風等による洪水のシミュレーションを行い、結果を3次元CGで表現することにより、住民の防災対策に役立てようとする試みがなされている^{26),27)}。今後は、ユーザーのみならず、土木構造物の管理者へも、詳細なセンサーデータと構造物データを元にライフサイクルコスト（LCC）を計算し、最適な維持管理・補修計画を対案するといったことが実用化されていくと思われる。

この他に、構造物等に付随する機器類に対してサイバーインフラストラクチャから種々の指令情報を与えることにより、自動的あるいは半自動的に機器類を動作させることが考えられる。例えば、河川の水位がある程度を超え、さら高くなりそうだということが、数多くの雨量や水位センサーからのデータとシミュレーションからサイバーインフラストラクチャにおいて推定された場合、危険と判断される橋梁を通行禁止にするゲートを操作する指令を半自動的に送るといったことが考えられる。過去のデータからは想定し得ないような自然現象が発生した場合、人間の判断だけでは指令が遅くなることがある。そうした場合、特に有効なシステムと評価されよう。

また、構造物の維持を目的とした空調設備の運転制御も現状では機器周辺の温度や湿度情報だけで行っていることがほとんどであろうが、天気の変化や風向等を考慮したよりインテリジェントな制御も可能になろう。こうした機能はサイバーインフラストラクチャの中のマルチエージェントが持つことになると考えられる。そのため、エージェントには形式的な知識のみならず、人間の経験則のような高度な知識も蓄える必要があろう。高密度なセンサー情報と高度なサイバーインフラストラクチャにより、防災・災害対策、環境、交通、社会基盤管理等に役立つような数多くの新しい現実世界への情報伝達メカニズムが生まれることが期待される。

5. 価値創造に向けて

企業経営において最も重要なものの一つは利益である。損益計算書における純利益（損失）は、以下の式で計算される。

純利益（損失）＝総売上高－費用合計
社会資本の建設から供用までを、企業経営に直接当

てはめることは困難であるが、費用合計の計算は容易である。総売上高は、電力や鉄道のように民間会社が経営していれば計算できるが、国や地方公共団体が所有する施設の売上高を計算することは容易ではない。しかし、道路や河川構造物等の社会資本が果たす基本機能が生み出す価値を総売上高とみなして、金額として評価する方法もあろう。しかし、実際は人間は全体とのバランスを感覚的に考慮したり、将来の姿を想像したりすることによって価値を評価し、費用合計との比較をして、必要性を直感的に判断していると想像される。また、人々の価値観は時代や環境の変化とともに大きく変化する。社会全体が貧困のうちは、衣食住のような生きていく上で必要なものが最も価値が高いが、豊かになれば芸術のようなものの価値が衣食住を越えてしまう。

さて、これまで、新しい社会資本建設の不必要性を叫ぶ声に対して、多くの土木技術者は、費用合計の低減、すなわち「コスト縮減」の努力を払うことによって対応してきている。しかし、総売上高に相当する価値が相対的に低減し、純粋な建設コスト以外に、環境破壊等の悪いイメージといった別のコストが増えるのであれば、建設コスト縮減の努力をしても、純利益は増えるどころか減ってしまう。

こうした状況を打開するためには、価値を大幅に増大させることが有効だと考えられる。しかし、道路や河川構造物の価値はいかにして大きくすることができるだろうか。社会資本が持つ基本機能（すなわち、車や人を通す、水を貯めるといった機能）だけでは、価値を大幅に増やすことは難しいだろう。

ところで、情報技術は、1980年代から今日まで、最も大きなインパクトを社会や他の学問分野に与えていると言っても過言ではあるまい。その進歩の速度すなわち変化率は、他の技術の進歩を凌駕している。先にも述べたように、ある程度ストックが大きくなり、飽和状態に近づくと、変化率が相対的に小さくなることから、ストックとしての大きさは認識しながらも、価値があまりないと捉えられるようになるのではないだろうか。したがって、飽和状態から程遠く、成長率が大きいものに価値があると思われるようになる。我々は、そうした価値観の大きな変化（パラダイムシフト）を今、経験していると考えられる。

すなわち、既に非常に大きくなっているものに少しの量を加えても、マクロ的にはあまり価値は増えないと感じられるのである。であるならば、ミクロ的にどうだろうか。ピンポイントの天気予報の需要があるように、既存の道路にピンポイント的な工夫を施すことによって、局所的に交通の流れが各段に改善され、それによって何らかの大きなインパクトがあるような

ことがあれば、それによって価値の増大を大きく感じる人々がローカルに発生するだろう。マクロの変化率を大きくすることが困難な状況であるからこそ、ミクロの変化率を大きくすることにより価値の増大を生み出すことが可能だと考えられる。しかし、現状のような土木構造物の計画、設計、施工、維持管理のライフサイクルにおける仕事の進め方では、ミクロの変化率を上げることを数多くの場所で実施することは、コストとマンパワーの点から困難である。

そこで、鍵となるのは、高密度なセンサーネットワークシステムとサイバーインフラストラクチャである。ミクロ的にローカルで価値を向上させるようなサービスを提供するためには、ローカルな情報が大量かつ密に必要な。そうした膨大な情報を短時間かつほとんど無人に近いくらいの少人数で処理することが重要である。次に、そうした情報をオープンにすることにより、ローカルなことに関心があり、何らかの方法で価値を上げたいと考えている人々がサイバーインフラストラクチャを利用することにより、様々なシミュレーションを短時間で行い、社会基盤施設に関する何らかの変更を加えることによりローカルに価値が上がるような方法を計画し、提案する。他のステークホルダー達は、サイバーインフラストラクチャ内で大いに議論し、必要に応じて更なるシミュレーションなどを実施する。合意に達し次第、工事を実施し、完成した後は、センサーにより完成前後の変化を評価する。このような方法が至るところで実施されるようになれば、社会基盤施設に対する価値は大きくなると考えられる。

社会基盤施設、センサーネットワークシステムおよびサイバーインフラストラクチャの価値観の経年変化は、以下のようにになると筆者は予想している（図-10）。現在は、社会基盤施設の価値が大きく、センサー類の価値はあるもののそれほど大きくない。サイバーインフラストラクチャについては価値は小さい。数年後は、次第に社会基盤施設の老朽化やニーズの変化等により、センサーシステムの価値が高まり、センサーの新規設置が盛んになる。それに伴って、センサー類から発生するデータ量が膨大なものになることから、そうしたデータをどう扱うか、どのように利用したらよいかが課題となり、やや遅れてサイバーインフラストラクチャ構築が進み、価値が高まってこよう。その後、密なセンサーネットワークシステムとサイバーインフラストラクチャにより、社会基盤施設へ価値をもたらすビジネスモデルがうまく作動することにより、社会基盤施設の価値が大幅に向上し、全体として価値ある社会が出来上がると想定している。

図-10 価値の経年変化の予測

6. おわりに

本論では、建設投資額減少など様々な問題に直面する土木分野の再生と将来の発展を目指して、社会基盤施設を対象とした情報基盤であるサイバーインフラストラクチャの構築と実社会基盤施設とのリンクを提案した。サイバーインフラストラクチャの要素的技術のうちデータモデル、マンマシンインターフェース、マルチエージェントについて概説し、実社会基盤施設のリンクの要素的技術については、ICタグ、センサーネットワーク、現実世界への情報伝達について概説した。さらに、サイバーインフラストラクチャとセンサーネットワーク類が社会基盤施設から、どのようにして価値を創造するか、その方法について論じ、想定されるアプリケーションについて述べた。

本論で述べた研究は現在実施中のものであり、プロダクトモデル、VR、ICタグ等の研究では実証した部分はあるものの、その他は提案あるいは研究中であり、まだ実証されていないものが含まれている。本論は、現在土木建設分野が抱える問題を考慮し、これまで筆者が実施してきた情報技術を土木分野に応用した土木情報学の研究に立脚し、将来あるべきシステムアーキテクチャとそれによって想定される価値創造の方法を述べたものである。したがって、このとおりになるとは限らない。しかしながら、将来なすべき研究テーマを数多く内包しており、今後鋭意研究を進めていこうと考えている。また、土木情報学の研究成果だけでは大きな変化を土木分野にもたらすことは困難であり、建設マネジメント分野の研究成果により、受発注方式や建設産業セクターのあり方等、組織的な見直しや改革があってはじめて、第三の波たる情報革命の真の利益が土木分野にもたらされるものと考えている。土木情報学と建設マネジメント学の両者は、いわば車の両輪となっていくと考えている。欧米の大学に比べると日本には両分野、とりわけ土木情報分野の研究者は多いとは言えないが、チャレンジ精神旺盛な研究者が参入し、切磋琢磨して大いに研究成果を将来あげることを期待している。

謝辞：本研究を進めるにあたり、独立行政法人日本学術振興会、財団法人日本建設情報総合センター、財団法人先端建設技術センター、財団法人北海道科学技術総合振興センター、社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会、社団法人日本鉄鋼連盟、電源開発株式会社から研究助成を受けた。土木学会情報利用技術委員会および構造工学委員会社会情報基盤小委員会、内閣府沖縄総合事務局北部ダム事務所、ICタグの建設分野での活用に関する研究会、有限責任中間法人IAI日本、スタンフォード大学土木環境工学科の関係者の方々からご助言を頂いた。ここに深く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) Alvin Toffler: The Third Wave, William Morrow and Co., Inc., 1980.
- 2) ユビキタスセンサーネットワーク技術に関する調査研究会：ユビキタスセンサーネットワークの実現に向けて（最終報告）、総務省、2004.7.
- 3) 矢吹信喜、志谷倫章：PC 橋梁の3次元プロダクトモデルの開発と応用、土木学会論文集, No. 784/VI-66, pp. 171-187, 2005.3.
- 4) 矢吹信喜、小谷隼、志谷倫章：バーチャルリアリティを利用したプロダクトモデルに基づく鋼桁橋設計システム、土木情報利用技術論文集, Vol. 13, pp. 211-220, 2004.10.
- 5) 矢吹信喜：橋梁3次元プロダクトモデルの国際標準の構築、橋梁と基礎, Vol. 39, pp. 47-52, 2005.7.
- 6) 矢吹信喜、志谷倫章、嶋田善多：4次元CADとEVMSを用いた切土盛土施工管理システムの開発、建設マネジメント研究論文集, Vol. 11, pp. 91-98, 2004.12.
- 7) 有富孝一、松岡謙介、上坂克己、奥谷正：3次元設計情報を用いた出来形管理技術の提案、建設マネジメント研究論文集, Vol. 11, pp. 81-90, 2004.12.
- 8) 本郷延悦、石村久治：橋梁鋼上部工を対象としたJHDM構築に関する研究、土木情報利用技術論文集, Vol. 12, pp. 11-20, 2003.10.
- 9) 蒔苗耕司：道路線形の関数表現を用いた道路設計情報モデルの構築とその実装、土木情報利用技術論文集, Vol. 13, pp. 205-210, 2004.10.
- 10) 土木学会情報利用技術委員会土木情報ガイドブック製作特別小委員会：土木情報ガイドブック、建通新聞社、2005.8.
- 11) 矢吹信喜、志谷倫章：XMLによる地震観測データの共通フォーマットに関する研究、開発技報, No. 44, pp. 13-18, 2001.9.
- 12) Peng, J. and Law, K. H.: Reference Data Models for Supporting the Network for Earthquake Engineering Simulation (NEES), Proc. of the 2005 International Conference on Computing in Civil Engineering, CD-ROM, ASCE, pp. 1-10, 2005.7.
- 13) Mita, A.: EDgrid as Cyber Infrastructure for E-Defense, Proc., The International Symp. on Innovation & Sustainability of Structures in Civil Engineer-

- ing, pp. 255-260, 2005.11.
- 14) 日本経済新聞：時代進める「知の修練場」，朝刊1面，2005.8.22.
- 15) Ullmer, B. and Ishii, H.: Emerging Frameworks for Tangible User Interfaces, "Human-Computer Interactions in the New Millennium," Addison-Wesley, pp. 579-601, 2001.8.
- 16) 財団法人日本建設情報総合センター：建設PM (EVM), JACIC 情報, No. 79, pp. 5-63, 2005.10.
- 17) Fischer, M. and Kunz, J.: The Scope and Role of Information Technology in Construction, J. Const. Manage. and Eng., JSCE, No. 763/VI-63, pp. 1-18, 2004.6.
- 18) 西田豊明, 木下哲男, 北村泰彦, 間瀬健二：エージェント工学, オーム社, pp. 97-156, 2002.7.
- 19) Shitani, T. and Yabuki, N.: A Concrete Bridge Design System Using Multi-Agents, Proc. of the 4th IEEE International Workshop on Soft Computing as Transdisciplinary Science and Technology, Springer-Verlag, pp. 695-704, 2005.5.
- 20) 矢吹信喜, 小谷隼, 小室雅人, ヒュンジュ・キム：マルチエージェントとプロダクトモデルを用いた3次元CAD環境, 土木情報システム論文集, Vol. 11, pp. 1-8, 2002.10.
- 21) Maher, M. L. and Zhang, D. M.: CADSYN: A Case-Based Design Process Model, AI-EDAM, Vol. 7, No. 2, pp. 97-110, 1993.
- 22) 嶋田善多, 矢吹信喜, 坂田智己：土木設備の維持管理体系における巡視点検とICタグの活用, 土木学会論文集, Vol. 777/VI-65, pp. 161-173, 2004.12.
- 23) 矢吹信喜, 志谷倫章：ICタグを用いたデジタル現場写真管理システム, 土木学会北海道支部論文報告集, No. 61, CD-ROM, VI-8, pp. 1-2, 2005.2.
- 24) Lynch, J. P., Partidge, A., Law, K. H., Kenny, T. W., Kiremidjian, A. S., and Carryer, E.: Design of Piezoresistive MEMS-Based Accelerometer for Integration with Wireless Sensing Unit for Structural Monitoring, Journal of Aerospace Engineering, Vol. 16, No. 3, ASCE, pp. 108-114, 2003.7.
- 25) Kurata, N. and Spencer, B. F. Jr.: Risk Monitoring of Buildings Using Wireless Sensor Network, Proc. of International Workshop on Advanced Sensors, Structural Health Monitoring, and Smart Structures, pp. 97-102, 2003.11.
- 26) 上野幹夫, 小林一郎, 山本一浩, 安重晃, 橋本淳也：レーザー計測データを用いた有限要素法による洪水氾濫解析, 土木情報利用技術論文集, Vol. 14, pp. 1-6, 2005.10.
- 27) 朱平, 堀宗明, 清野純史, 藤野陽三：地震被害の共通認識形成を目的とした広域都市モデルの構築にむけて, 社会技術研究論文集, Vol. 2, 435-443, 2004.10.

(2005.10.3 受付)