

Webによる情報共有型 橋梁マネジメントシステムの開発

水野裕介¹・阿部雅人²・藤野陽三³・Sandy MERET⁴・阿部允⁵

¹正会員 修士（工学） 東京大学特任研究員 工学系研究科社会基盤工学専攻
(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

E-mail:mizuno@bridge.t.u-tokyo.ac.jp

²正会員 Ph.D. 株式会社BMC主幹研究員 (〒261-7125 千葉県千葉市美浜区中瀬2-6)

³フェロー Ph.D. 東京大学教授 工学系研究科社会基盤工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

⁴Member of JSCE, M.S., Foundation Techniques Ltd. (14 Wang Tai Rd., Kowloon Bay, Kowloon, Hong Kong)

⁵フェロー 株式会社BMC代表 (〒261-7125 千葉県千葉市美浜区中瀬2-6)

本研究では、橋梁の維持管理業務において情報の共有・再利用に着目したマネジメントシステムについて検討し、プロトタイプを構築した。情報収集を効率的に行うために現場作業に適した端末の選定しインターフェースの設計を行い、目視検査支援システムを構築した。また、橋梁の維持管理に関する情報を記述するためのマークアップ言語BridgeMLを策定し、再利用可能かつネットワークを通じた交換を前提にした橋梁情報の管理手法を試みた。さらに、蓄積される情報の中から効率的にデータの関連やパターンを見えるデータマイニング手法を用いて、維持管理に関する有用な情報を抽出する手法を検討し、既存橋梁の維持管理データを対象にいくつかの有用なルールが抽出されることを確認した。

Key Words : bridge management system, database, visual inspection, XML, data mining

1. はじめに

これまで継続的に社会基盤構造物が構築され、道路・鉄道をはじめとする交通インフラのストックは膨大なものとなっている。近年、トンネルや橋梁をはじめとする構造物の劣化が顕在化しており、社会基盤のサービスレベルを一定以上に保ち、コストの縮減および人的資源の有効活用が大きな課題となっている。

構造物の運用・維持管理においては、取り扱う情報が多岐にわたり、何らかの意思決定を行う際には、構造諸元や履歴等の構造物自身が持つ情報に加えて、地盤状況や周辺環境、特に交通インフラの場合は交通ネットワーク全体を併せて検討する必要がある。また、モニタリングシステムを構造物に設置する場

合は、取得した大量のデータを効率的に管理する必要がある。

橋梁に関しては、米国において各州が包括的な橋梁マネジメントシステム(BMS)の運用を行っており、多くの州がPontis^{1),2)}を採用している。Pontisは、橋梁に関する情報を保存するデータベースと劣化予測や補修・補強に関する予算配分を最適化するためのアプリケーションから構築される。特に劣化予測においてはデータベース中の過去の履歴をもとに劣化モデルを修正する機能を持つ。日本においても、さまざまな研究機関・大学でBMSの開発が行われておる、例えばRC橋の性能評価や劣化予測をサブシステムに持つBMSの開発・運用が行われている^{3),4)}。

既存のBMSは、構造物管理者に対して有効な意思決定支援を行うが、情報管理において改善の余地が

ある。一つは情報取得に関する課題であり、検査データを入力する検査員に対する支援が欠落していることである。また、構造物に関するデータはBMS内で処理されることを前提としており、他のシステムや構造物管理者間での情報共有や相互運用が考慮されていない。さらに、継続的に蓄積される情報の中で劣化予測や維持管理計画の最適化などアプリケーションで利用されるものは限られており、情報が有効に活用されていない。

情報を取得する検査員支援として、ウェアラブルPCやPDAを用いた検査支援システムに関する研究⁵⁾⁻⁷⁾が行われている。特に、PDAと音声技術を用いた現場点検支援システム⁷⁾では、VoiceXMLにより熟練検査員の暗黙知を知識ベースに蓄積し運用する試みが行われている。これにより現場点検の作業効率が向上することが見込まれている。しかし、これらの検査支援システムは検査作業に特化しており、構造物の維持管理業務を包括的に支援するマネジメントシステムへの統合が今後の課題となっている。

構造物に関する情報を共有し、複数のシステムで相互運用を行うためにプロダクトモデルに関する研究^{8),9)}が行われている。プロダクトモデルに関する研究では、構造物のプロダクトモデルをXMLで実装し、設計照査システムや積算システムが開発され、また、CADシステムとの統合も行われている。また、道路構造物のデータモデル構築に関する研究¹⁰⁾では、XMLによる実装とXMLとCADファイルの連携について検討が行われている。しかし、構造物の検査情報や補修・補強履歴といった維持管理情報を共有・運用するためのデータ構造定義は行われていない。

データベースに蓄積された情報から有用な知識を抽出する方法としてデータマイニングがある。土木分野においては、橋梁の損傷要因やがけ崩れの発生要因、橋梁伸縮継ぎ手の損傷要因を対象としたデータマイニングの研究¹¹⁾⁻¹³⁾が行われている。これらの研究では対象とするドメインに関する有用なルールの抽出を行っているが、マネジメントシステムと組み合わせた継続的なデータの収集・管理・運用といった情報のサイクルについては言及していない。

そこで本研究では、上記に示した課題を解決するための情報の共有・再利用に着目した社会基盤構造物マネジメントシステムを提案し、そのプロトタイプを開発した。プロトタイプには、情報取得のためのPDAを用いた検査員用システム、橋梁の維持管理に関する情報を表現するBridgeML、蓄積される維持管理情報から効率的に有用な知識を抽出するデータマイニングアプリケーションが構成要素として含まれる。これら三つの構成要素はいずれも情報の收

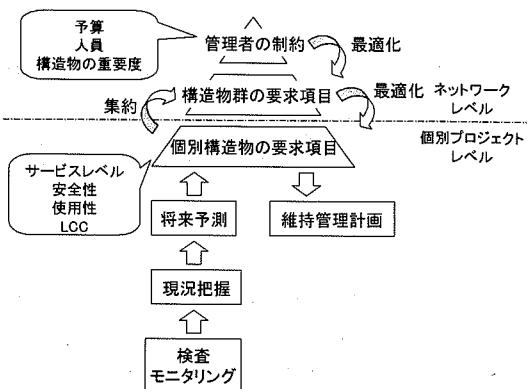


図-1 社会基盤の維持管理プロセス

集・管理・運用のサイクルに深く関わるもので、これらを統合することにより維持管理に関する情報の価値が高まり、構造物に関するより詳細な評価や説明責任の向上が見込まれる。

2. 社会基盤マネジメントシステム

(1) 社会基盤の維持管理

維持管理業務の一般的なプロセスを図-1に示す。まず、既設構造物において定期的な検査やモニタリングが行われ現状を把握するための基礎データが取得される。これらの情報をもとに健全度や耐久性などの現況把握を行い、また必要に応じて劣化等の将来予測を行う。その後、当該構造物に関してサービスレベル、安全性、使用性等を考慮して、補修・補強の要否や監視項目といった要求項目をまとめる。次に、対象とする構造物が交通ネットワークに属するように他の構造物と併せて管理・運用する必要がある場合、ボトムアップ方式で構造物群として要求項目を集約する。

これら要求項目は、予算、人員といった構造物管理者側の制約によりトップダウン方式に最適化が行われる。最適化は、ネットワークレベルの構造物群、プロジェクトレベルの個別構造物の順に行われる。最適化された要求項目を基に最終的に構造物の維持管理計画が策定される。

(2) システムデザイン

維持管理業務においてはそれぞれのプロセスにおいて現場検査員、橋梁技術者、構造物管理者の意志決定・判断が行われている。構造物マネジメントシステムはそれら意志決定・判断を支援するアプリケ

ーションと維持管理に必要とされる情報を保存・管理するためのデータベースにより構成され、ネットワークを通じてさまざまなユーザからのアクセスを可能にする。

本研究では図-2 に示すような社会基盤構造物マネジメントシステム Civil Asset Management Portal (CAMP) を提案する。CAMP の構成要素は、データベース、アプリケーションおよび Web インターフェースである。アプリケーションは維持管理業務を支援するためのツールを提供し、またユーザがデータの追加・削除・更新等の操作を行うデータ管理機能を含む。Web サーバはシステムをネットワークを通じて利用するためのインターフェースを提供する。データベースに関しては、構造物諸元・履歴等のテキスト情報に加えて、CAD、GIS、モニタリングシステムと連携させてこれらをデータソースとして利用することを検討している。

(3) システム構成

CAMP では、Web アプリケーションベースのシステムを構築する。Web アプリケーションは図-3 のような多層型分散アーキテクチャを採用する。このようなアーキテクチャでは、システムを複数のコンポーネントに分割し、それぞれのインターフェースを定義することにより、個々のコンポーネントを独立して開発することができる。そのため、システムの使用性、拡張性、信頼性、メインテナンス性の向上を図ることができる。

クライアント層は、クライアント機器、Web ブラウザおよびプラグインソフトウェアで構成される。ユーザはクライアント層を通じてサーバにアクセスする。また、PC だけでなく、PDA や Web ブラウズ機能を持つ携帯電話をクライアント層に用いることが可能である。

サーバ側のアプリケーションは、プレゼンテーション層、アプリケーション層、データストア層から構成される。プレゼンテーション層は、サーバ側のクライアント層に対するインターフェースであり、クライアントからのリクエストを受け取り、次に示すアプリケーション層にリクエストを渡し、アプリケーション層からのレスポンスをクライアント層に対して、一般的には HTML のプレゼンテーションコードを動的に生成する。

アプリケーション層では、アプリケーションで用いるロジックを実装し、ユーザのリクエストに応じて処理を実行する。また、データストアに対してデータの保存、操作、検索、分析を行う。

データストア層では、データを格納し、データを

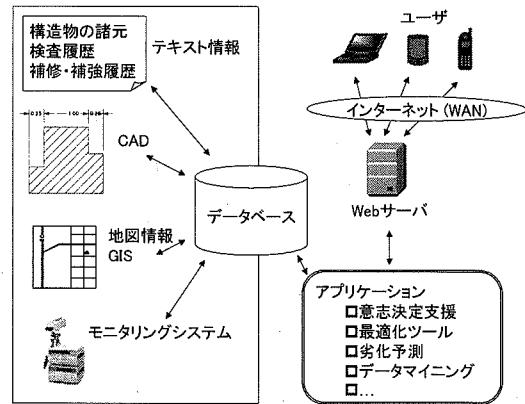


図-2 Civil Asset Management Portal

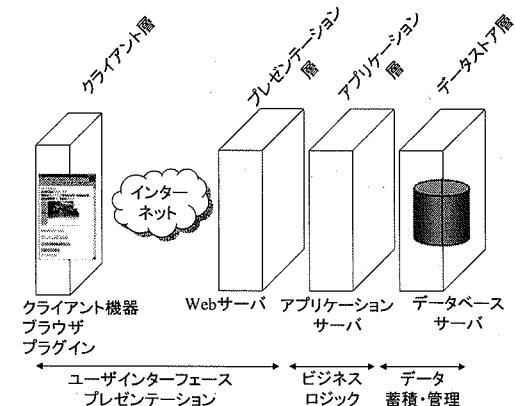


図-3 多層モデルによる Web アプリケーションの構築

管理・操作するための機能を提供する。通常データストア層には、リレーションナルデータベースを用いる。

(4) データソースの統合

CAMP は、維持管理に関する情報を統合的に管理するためのプラットフォームを提供し、様々なシステムとの連携を考慮する必要がある。ここでは社会基盤構造物マネジメントシステムに統合すべき既存のシステムについて、その特徴と構造物の維持管理分野との関連について述べる。

a) GIS

地理情報システム (Geographic Information System: GIS) は、地理的位置と位置に付随する情報を管理するもので、それらの情報に関する加工・分析・可視化ツールを提供し、意志決定を支援するシステムである。GIS は多くの公共機関や企業に導入されており、様々な用途に利用されている。地方自治体では

GIS を用いて、都市計画のための土地利用図や、ハザードマップなど災害時の計画図を作成・管理している。また、電力・ガス会社では、送電線や配管などのネットワークを管理するために GIS を利用している。

社会基盤構造物の維持管理においても GIS による位置情報と属性情報の管理が重要である。橋梁やトンネルなどの交通ネットワークを構成する構造物は、個々の構造物の維持管理とともにネットワーク機能に着目した維持管理が必要である。また 斜面・盛土など面的な広がりを持つ構造物は、位置情報とその位置における属性情報をあわせて管理する必要がある。

b) CAD

CAD (Computer Aided Design) システムは、構造物の設計図を電子情報として作成・管理する。維持管理においては、変状・損傷箇所の特定や、補修・補強箇所の選定、大規模改修において構造物の設計図を参照する必要がある。このように構造物の維持管理において、部材・部位・部品等の位置情報を効率的に管理する必要があり、CAD システムとの連携が重要となる。

c) モニタリングシステム

モニタリングシステムは、継続的に構造物を監視し、現況を把握するために有用である。しかし、通常モニタリングシステムは同種のセンサ群とデータ収録機器で完結している場合が多く、構造物全体や複数の構造物を統合的に管理することができない。また、モニタリングシステムはマネジメントシステムと独立しており、構造物管理者によるモニタリングデータを反映した意思決定が行われにくい。モニタリングシステムとマネジメントシステムの統合により、構造物の現状把握が迅速になり効率的な意志決定に繋がる。特に自然災害などの緊急時にはモニタリングシステムからの情報が意志決定に重要な役割を果たす。

(5) システムの実装

本研究では、サーバとして CPU Pentium4 2GHz、メモリ 512MB、ハードディスク 144GB (72GB×2) の PC を使用した。OS として Red Hat Linux8.0、データベースとして Oracle9i Database (9.0.1)、アプリケーションサーバとして IBM WebSphere Application Server v.4.0.1、Web サーバとして IBM HTTP Server v.1.3.19 をインストールした。これらのソフトウェアは採用実績が多いことやサーバとしての性能・安定性に優れていることを考慮し採用した。

図-4 に示すように本研究では CAMP サーバと三

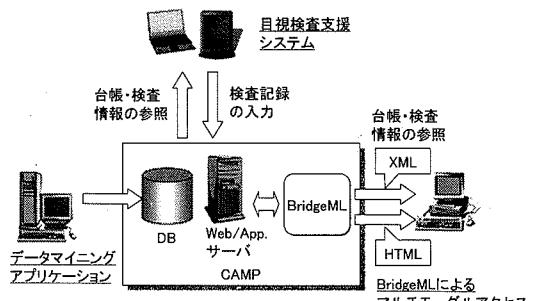


図-4 プロトタイプの構成

つのサブシステムを構築した。目視検査支援システムは、PDA を用いて検査情報の収集を効率的に行うことの目的とし、クライアント端末とサーバの PDA インターフェースにより構成される。BridgeML はサーバ上で橋梁に関する情報を XML で記述することにより他のシステムとの相互運用、情報の共有を促進する。また、本研究では BridgeML を用いた複数の出力チャンネルを持つマルチモーダルアクセスを実現する。データマイニングアプリケーションは、CAMP データベースに蓄積された情報から有用な知識を抽出する。

3. 橋梁目視検査支援システム

(1) 橋梁維持管理における人員・情報の分散

社会基盤施設の建設および維持管理業務は、施工、設計、施工、検査、財務管理など多種多様な専門技術・知識を持った職種により構成されている。プロジェクトの複雑化により参画する人員の数や職種の数は増大する傾向にある。特に、大規模プロジェクトでは、建設や維持管理を行う現場と意志決定を行う場合は通常異なり、参画者も地理的に散在し、何らかの通信手段を用いて意志決定に必要な情報のやりとりをする場合がほとんどである。さらにこのような情報のやりとりがプロジェクトに与える影響はきわめて大きく、効率的な情報交換はプロジェクトの工期短縮、コスト削減につながる。

橋梁の検査を例に挙げると、現場においてはあらかじめ策定された検査手順により作業を進める。しかし、現場において何らかの重大な損傷が発見された場合、橋梁の使用停止を含めて緊急的な対応が必要な場合がある。このような場合、現場と橋梁技術者、交通ネットワーク管理者、意志決定者が密に連絡を取り合って問題を開拓する必要がある。この中

でも特に重要なのが現場からの情報である。

(2) 維持管理参画者の役割

本研究では橋梁維持管理の参画者を表-1 のように分類した。この中でも橋梁技術者が中心的役割を果たし維持管理計画を作成する。検査者は現場において情報を収集するため、技術者の作成した検査計画に従い検査を実施し、検査報告書を作成することで情報を他に伝達する。技術者は、検査報告書を元に補修・補強計画および新たな検査計画に加えて予算計画を含む維持管理計画を策定する。財務担当者は策定された維持管理計画の予算を査定し、管理者が承認を行う。ただし、維持管理計画の策定は技術者、財務担当者、橋梁管理者間で修正が行うことができる。小規模な組織であれば、各参画者間の情報伝達に要する時間やコストは小さいが、大規模な組織や多数の橋梁を管理する組織においては情報共有・伝達のコストは大きい。そこで情報共有・伝達を促進するシステムが必要となる。

(3) 情報共有プラットフォーム

橋梁マネジメントシステム(以下 BMS)は、諸元、検査記録、修復・改造履歴等の橋梁に関するデータをデータベース上で管理し、橋梁の劣化予測などの解析手法を提供し、また維持管理計画の最適化を行い、橋梁所有者または管理者の意思決定を支援するための包括的なシステムである。本研究では、CAMP のサブセットとして、表-1 に示す参画者間の情報の共有・伝達に着目し、協同作業を支援するシステムの設計を行った。

橋梁検査員は、主として現場において作業を行うため、現場作業に適したクライアント端末としてノート PC および PDA (Personal Digital Assistant) を想定する。PDA は、携帯情報端末と呼ばれ、主にスケジュールや住所録などの個人情報を管理する PIM (Personal Information Manager) 機能を搭載している。サイズはノート PC に比べて非常に小型で軽量であるが、CPU パワー、メモリ等リソースの面で PC に劣る。そのため、共同作業環境を構築する場合、PC や PDA のリソースに応じてインターフェースを設計する必要がある。

検査員以外のユーザに関しては、オフィスでの業務が主であるため、PC をクライアント端末としたインターフェースを構築する必要がある。

(4) 目視検査員用システム

CAMP には複数のインターフェースが存在するが、その中でも検査員に着目してインターフェースのプ

表-1 想定する維持管理業務参画者

役割／職種	業務内容
橋梁技術者	<ul style="list-style-type: none">・検査計画の策定・検査報告書の承認・維持管理計画の策定・施工計画書の作成・施工完了の承認・施工完了報告書の作成
検査員	<ul style="list-style-type: none">・現場検査・検査報告書の作成
構造物管理者／所有者	<ul style="list-style-type: none">・維持管理計画書の承認・施工完了報告書の承認
財務担当者	<ul style="list-style-type: none">・維持管理計画予算の査定
補修・補強施工者	<ul style="list-style-type: none">・補修・補強施工の実施・作業報告書の作成

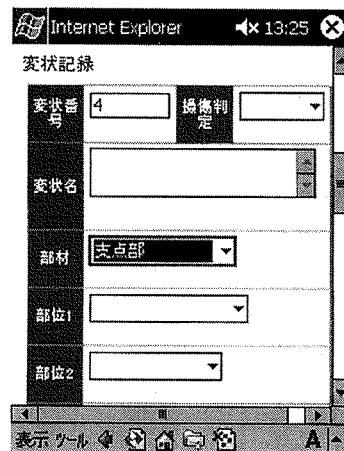


図-5 PDA 用検査画面

ロトタイプを構築した。クライアント側の PDA には OS として Windows Powered Pocket PC 2002、Web ブラウザとして Pocket IE を用いた。

検査者は PDA を携帯し、検査記録を入力する。検査記録はサーバ上に保存され、検査者は検査に際しサーバから支援情報を受け取ることが可能である。図-5 は PDA 画面上に表示された検査メニューの一例である。

このプロトタイプにおいてサーバとクライアントの接続を無線 LAN で行い、PDA 用インターフェースの実用性の確認を行った。また、PDA に PHS 端末(通信速度 64kbps)を接続し両者をインターネットに接続したところ、画像の読み込みに多少時間がかかるものの、コンテンツのほとんどはテキストであり、無線 LAN と比べて使用性に大きな違いは見られなかった。

実際の橋梁検査においては、携帯電話やPHS等の通信環境が整っていない場合もあり、PDA上にある程度情報を蓄えてオフラインで検査入力を行えるシステムが必要である。そのため、オンライン環境とオフライン環境の両方で使用できる検査支援システムの開発が今後の課題である。

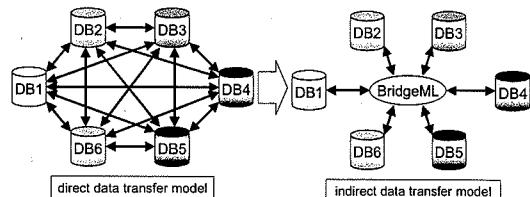


図-6 データ交換

4. 橋梁マークアップ言語 (BridgeML)

(1) XMLによる橋梁情報の記述

XML (eXtensible Markup Language) は、データの構造化や型付けを表現する方法を提供し、情報をタグ付けしたテキストで表現する。そのため、プラットフォームや言語に依存しないため、Web上で情報流通手段として用いられている。

また、特定の分野を対象にXMLベースで情報を記述する仕様が策定されている。例えば数学、音楽、ニュースに関する記述がそれぞれMathML, MusicML, NewsMLとして策定^[14]されている。本研究では橋梁の維持管理に関する情報の共有・再利用を実現するために、橋梁情報を記述するBridgeML (Bridge Markup Language) を提案する。

(2) BridgeMLによる情報交換

BridgeMLを使用する利点として情報交換が容易になることが挙げられる。橋梁のライフサイクルは非常に長く、計画、建設、維持管理、撤去・架替えという一連のサイクルには検査専門会社、建設請負業者、コンサルタント、管理者等複数の組織が関与する。そのため、これら複数の組織間における情報の共有または伝達が必要不可欠である。現状では、複数の組織に共通した橋梁データを管理するためのフォーマットは存在せず、必要に応じてあるフォーマットから別のフォーマットへ変換するためのコンバータを用意する必要がある。これは必ずしも電子情報のコンバータではなく、手作業により紙媒体を扱うことも含まれる。一般に情報を変換するコンバータの作成は非常に労力とコストを要する。

複数の組織が橋梁の維持管理に関してそれぞれ独自のフォーマットで定義されたデータベースを持つ場合、図-6 の左図のようにそれぞれのデータベース間におけるコンバータの作成が必要である。このような多くのコンバータを作成するためには多くのコストや労力を必要とし、またデータ交換時の変換ミスなどのリスクが大きくなる。それに対し、橋梁の維持管理に関するデータフォーマットをBridgeMLで統一した場合、図-6 の右図のようにデータ共

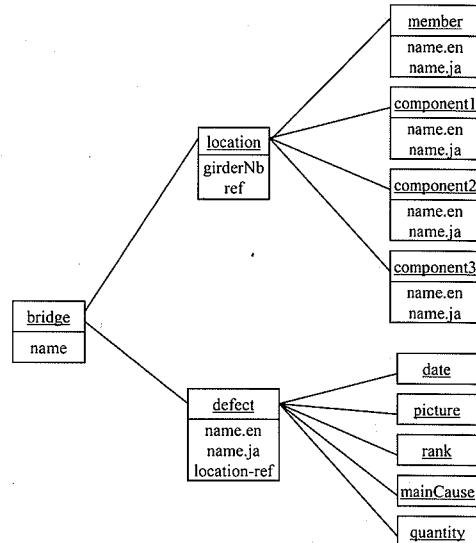


図-7 BridgeML ドラフト 1 の論理構造

有・交換が可能になる。図に示されているように6つのデータベースを考えた場合、それぞれの間でデータ交換を行うためには15のコンバータが必要となる。それに対し、BridgeMLを用いた場合、コンバータは6となる。

BridgeMLは複数の組織間でのデータ共有・交換を容易にする。これは橋梁の維持管理において複数の組織が関わる場合、情報共有・交換に必要なコストを削減する。また、BMSやモニタリングシステムなど橋梁の維持管理に関わるアプリケーションを構築する場合に、データフォーマットをBridgeMLに準拠させることで開発コスト工期を削減することができる。これはアプリケーション開発者だけでなく、利用者側にとってもアプリケーション導入コストが小さくなる利点がある。

(3) BridgeMLドラフト1

ドラフト1では、目視検査による変状記録と変状位置を扱う。論理構造を木構造形式で図-7 に示す。

ルート要素は橋梁を表すbridgeであり、属性として橋梁名を表すnameを持つ。また子要素として変状

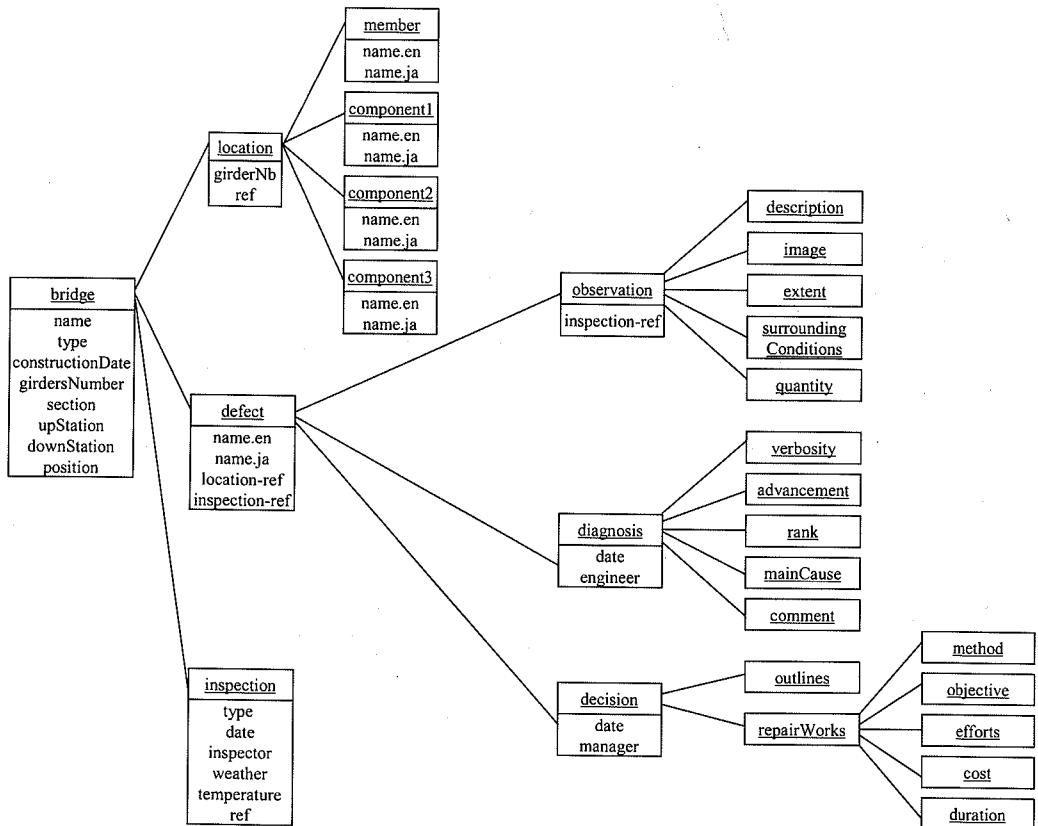


図-8 BridgeML ドラフト 2 の論理構造

位置を表すlocationおよび変状の詳細を記述するdefectを持つ。

要素locationは変状位置を表し、属性として桁番号を表すgirderNbと対応するdefect要素を参照するポインタを持つ。子要素として橋梁の部材や位置を示すmember, component1-3, を持つ。要素member, component1-3は橋梁の部材や部品名に相当しそれぞれ属性として日本語名、英語名を持つ。

要素defectは変状の詳細を表し、属性として要素locationから参照するためのIDと日本語名、英語名を持つ。また子要素として、検査日を表すdate, 変状写真を表すpicture, 変状ランクを表すrank, 変状原因を表すmainCause, そして変状量を表すquantityを持つ。

(4) BridgeML ドラフト 2

BridgeML ドラフト1はプロトタイプアプリケーションの中で橋梁情報を記述するために用いたが、その構造は単純であり、実際に橋梁マネジメントシステムで用いるには不十分である。ドラフト2ではより詳細な情報を記述できるように仕様を策定した。

論理構造を図-8 に示す。

ドラフト1と同様にルート要素はbridgeであり、その下に当該橋梁に関する情報が含まれる。すなわち一つのXMLファイルが一つの橋梁を記述する。

BridgeMLは橋梁の維持管理を対象としているため、重要な要素は変状であり、defect要素に記述する。変状はその詳細以外にも、変状位置という空間的要素と検査日という時間的要素を持つ。そのため空間的要素をlocation要素で記述し、時間的要素をinspection要素で記述する。またinspection要素には検査日以外にも検査員などの検査に関する情報を記述する。

場合によっては一つの変状位置に複数の変状が存在し、また一つの検査情報は複数の変状情報を含むことがあり得る。そこで、情報の冗長性を省くためにlocation要素、inspection要素、defect要素を独立して記述し、location要素とdefect要素およびinspection要素とdefect要素を1対多の関係で表現する。XMLの木構造ではこれら3つの要素はすべてbridge要素の子要素として同じレベルに位置する。これらの要素を関連づけるために、location要素とinspection要素に

IDを付与し、defect要素からこれらのIDを参照する。

変状を記述するdefect要素は、子要素として3つの要素を持つ。それらは検査員による調書であるobservation要素、橋梁技術者による診断を記述するdiagnosis要素、橋梁管理者による対処などの意志決定を記述するdecision要素である。

(5) マルチモーダルアクセス

通常WebアプリケーションはプレゼンテーションコードとしてHTMLを出力するが、その場合クライアントとしてPCを想定する場合が多い。本研究では橋梁維持管理において様々なクライアント環境を想定している。そこで、図-9のように複数の出力チャンネルを構築し、マルチモーダルアクセスを可能にした。

サーバ内では橋梁に関する情報をXML形式(Bridge MLドラフト1)で管理し、出力の際にXSLTを用いて通常のHTMLまたはPOC XMLを出力する。XSLTはXML文書の構造を他の構造に変換するための変換ルールを記述するもので、XSLTによる変換を実行するプロセッサとしてXalan¹⁵⁾を用いた。

a) HTML チャンネル

HTMLチャンネルは、BridgeMLをPC用のWebブラウザで表示するためのもので出力結果は図-10のようになる。図-10では、橋梁の変状記録を表示している。

b) POC チャンネル

POCチャンネルでは、クライアント側のアプリケーションとしてPOC Communicatorを採用した。POC(Public Opinion Channel)¹⁶⁾は、コミュニティ支援を行うシステムである。POCではコミュニティ・メンバが自由に情報を発信し、コミュニティで情報を共有する。共有される情報はXML形式で記述され、音声として情報を出力することができる。本研究では、POCで採用されたXML形式(POC XML)で橋梁情報を記述し、図-11に示すようにクライアントアプリケーションでは、画面右上にあるエージェントにより音声出力を行うチャンネルを構築した。

5. データマイニングによる知識ベースの構築

(1) データマイニング

膨大なデータの中から隠れた有用な知識を獲得するデータマイニングが注目されている。データマイニングは、データからの知識発見(KDD: Knowledge Discovery in Data)とも呼ばれ、人工知能、機械学習、データベース、統計学や経営学にまたがる横断的な

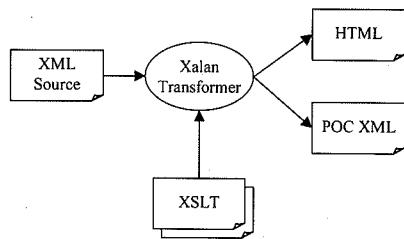


図-9 複数の出力チャンネル

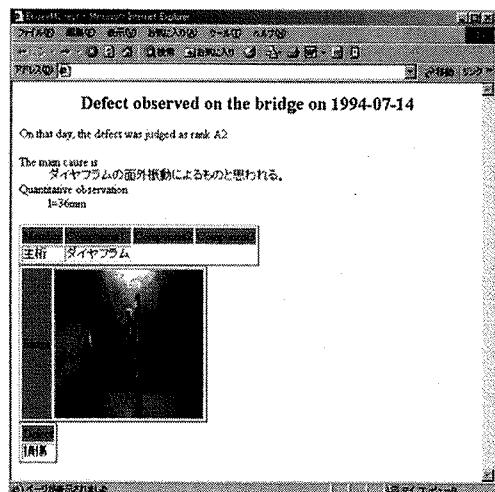


図-10 HTML チャンネルの出力例

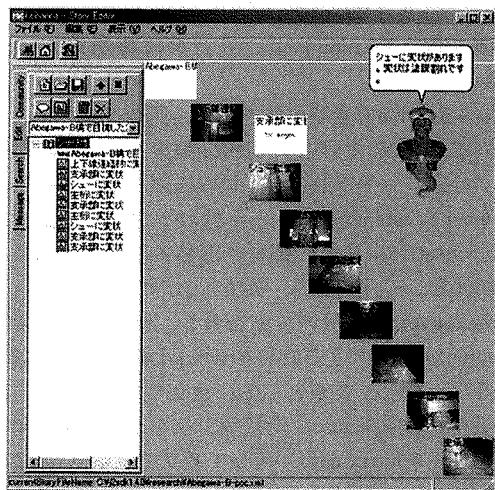


図-11 POC チャンネルの出力例

学問領域を形成している。

データマイニングは、主にデータの前処理、マイニングアルゴリズムの適用、後処理の3つの部分から構成される。前処理では、対象とするデータの品

質を確保するために行われ、欠損値の処理やノイズデータの除去、離散化や数値化などのデータ変換が行われる。マイニングアルゴリズムには、統計解析、決定木、ニューラルネットワーク、遺伝的アルゴリズム等が用いられる。後処理では、データの可視化や分析・検証が含まれる。

(2) CARTによる決定木の構築

決定木は、分類や予測を行う際に用いられている手法であり、ある注目する属性(従属変数)に関する重要な知識を、木構造によるルールの組み合わせで表現したものである。決定木を用いる利点として、ニューラルネットワークとは異なり、人が容易に理解できるルールが抽出できることが挙げられる。決定木によって得られたルールはIF-THEN形式のプロダクションルールによって簡単に表現することができる。

CART(Classification and Regression Tree)は、決定木を構築する最も一般的なアルゴリズムの一つで、各ノードにおける分岐が2となる2進決定木である。以下にアルゴリズムについて分岐を行う分割テスト、決定木の構築、枝刈りについて述べる。

a) 分割テスト

CARTは、各ノードで1つの独立変数で分岐させていくことにより、2進木を作成する。分岐の評価を行う尺度として、多様性を表す評価関数を用いる。評価関数は従属変数が均等に存在していれば大きな値をとり、従属変数が1つの値しかない状態に近づけば小さな値をとる。各ノードではこの評価関数をもっとも減少させるような最良分岐を行う。

CARTでは、従属変数が数値データとして表現される場合は、ノード内の従属変数の分散を評価関数として用いる。従属変数がカテゴリデータで表現される場合は、評価関数として式(1)で示されるGini係数(Gini index)を用いる。 $p(i|t)$ はノード t 内で従属変数があるカテゴリデータである割合を示す。従属変数が2値で表現される場合の評価関数は式(2)のようになる。 $p(0|t)$ はノード t 内で従属変数が一方の値である場合を示す。

$$d(t) = 1 - \sum_i \{p(i|t)\}^2 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} d(t) &= 1 - \sum_{i=0}^1 \{p(i|t)\}^2 \\ &= 1 - \left[\{p(0|t)\}^2 + \{p(1|t)\}^2 \right] \\ &= 1 - \left[\{p(0|t)\}^2 + \{1 - p(0|t)\}^2 \right] \\ &= 2p(0|t)\{1 - p(0|t)\} \end{aligned} \quad (2)$$

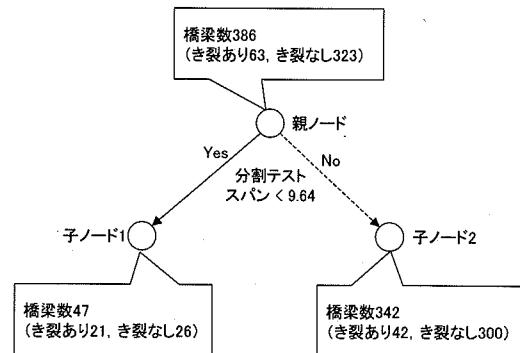


図-12 決定木の例

ここでは、例として橋梁におけるき裂発生の有無について分割テストと評価関数について説明する。従属変数はき裂発生に関して有または無のいずれかの値をとる。対象とする橋梁は全386橋、そのうちき裂が発生しているものは63橋、き裂が発生していないものは323橋である。図-12に示すようにこの状態を親ノードしてある分割テストを行うと、子ノード1ではき裂あり21橋、き裂なし26橋、計47橋、子ノード2ではき裂あり42橋、き裂なし300橋、計342橋となる。親ノードでの評価関数は0.271であり、子ノード1、2はそれぞれ0.494、0.215となる。分割テストによる評価関数の減少は親ノードの評価関数と子ノードの評価関数の重み付き平均との差で表され、0.022となる。

b) 決定木の構築

根ノードにおいて上記のように分割テストを行い、下位の各ノードを分岐していく。木の上部において分岐変数となったカテゴリ値を持つ変数は、すぐに単一な値になる傾向がある。2つ以上の値を持つ変数によって最良な分類を行い、多様性を大きく減少させる分岐が見つかなくなったとき、分割テストを終了し、ノードを葉とする。

分岐すべきところがなくなり、葉ノードだけになれば、すべての分岐処理は終了する。この時点で決定木はもっとも大きな木に成長している。後に述べるように、学習用データによく当てはまるように構築された最大決定木は、新しいデータレコードを最もに分類するものではない。そこで次に述べる枝刈りを行う。

c) 枝刈り

CARTアルゴリズムは、まずははじめに根ノードにおいて、データ全体に対する最良分岐を行う。このときには、分岐を探す時に用いるデータレコード数は多い。分岐を進めて木が成長するとデータレコード

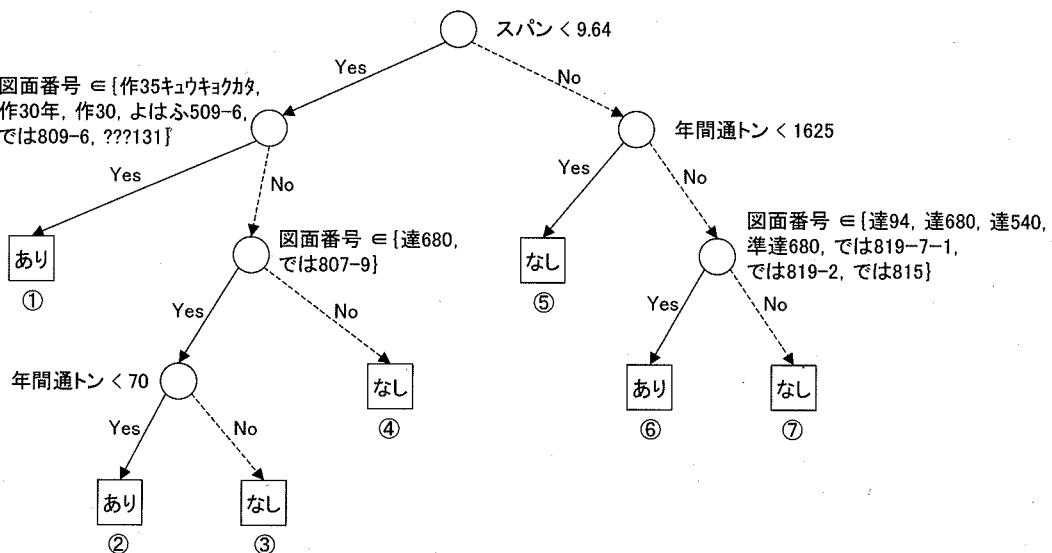


図-13 き裂の発生傾向を表す決定木

ド数が徐々に少なくなっていく。そして木が終わりに向かうに従い、より少量のデータレコードによって及ぼされる傾向が強くなっていく。

ここでは、予測精度が高い部分木を選んでいく手順を述べる。どれだけ深く枝刈りするかを決めるために、はじめに繰り返し枝刈りを行うことによって候補となる部分木を決める。もっとも予測に貢献していない葉から枝刈りしていくことを目標とする。1葉あたりの予測力がない枝葉を決めるために、調整済み誤分類率の概念を取り入れる。この指標は、葉数によるペナルティを与える、そのペナルティにうち勝つほどには誤分類率が下がらない弱い枝葉を見つけるためのものである。見つけられた枝葉は、枝刈りを行う候補になる。

(3) 橋梁検査記録からの知識獲得

本研究では、鋼鉄道橋の検査データをもとに決定木によるルール抽出を行った。決定木はデータベース中の対象とする属性に関する知識を、木構造によるルールの組み合わせで表現したものである。ルールを頂点ノードから終端に至るまでの、分割テストの IF-THEN ルールとして簡単に表現することができる。

a) 対象とするデータ

対象とする構造物を鋼鉄道橋とし、橋梁形式を上路プレートガーダー、組み立て構造をリベット形式とし、変状としてき裂の発生の有無を従属変数とし、それ以外の項目を独立変数としてデータマイニング

表-2 データ構造

項目	データ型	備考
設計荷重	テキスト型	
図面番号	テキスト型	
構造形式	テキスト型	
単複	テキスト型	単線／複線の区別
スパン	浮動小数点型	単位[m]
使用開始年	整数型	西暦
年間通トン	浮動小数点型	交通量、単位[ton]
斜角の有無	セット型	「あり」／「なし」
曲線	セット型	「あり」／「なし」
溶接補強	セット型	「あり」／「なし」
き裂の発生	セット型	「あり」／「なし」

を行った。橋梁連目数は 389 であり、そのうちき裂が発生している連目数は 63 であった。用いたデータ構造は表-2 に示す。対象データの項目は、橋梁情報を管理するデータベースから得られたもので、データの欠損や誤りの少ないものを選択した。

b) 決定木の導出

導出された決定木を図-13 に示す。根ノードでは「スパン」による分岐が行われ、次に子ノードでは「図面番号」、「年間通トン」による分岐が行われている。最終的に 7 つの葉ノードが生成されている。

この決定木を導出に用いた橋梁データに適用すると表-3 のようになる。決定木による予測と対象データを比較すると、予測の精度は正:361 件 (92.80%)、誤:28 件 (7.20%) となった。対象データのき裂発生連目は 63 (16.20%) であり、決定木による予測は有意

なものと考えることができる。

c) プロダクションルールへの変換

前項では決定木全体の評価を行ったが、ここでは、決定木の根ノードから葉ノードへのルートをIF-THEN形式のプロダクションルールに変換する事により、決定木を複数のルールに分割し、個々のルールについて評価する。プロダクションルールを表-4に示す。なお、ルールに示された番号は、図-13の葉ノードに対応する。

得られたプロダクションルールの評価指標として、確信度とサポートを表-5に示す。表中のルール該当データは、対象データ中でそれぞれのルールの前件部(IF節)に該当するデータ数を表す。整合データはルール該当データのうち、ルールによる予測と実際のき裂発生が整合したデータ数で、矛盾データは予測と実際のき裂発生が一致しなかったデータ数である。確信度は、整合データをルール該当データ中の割合で示され、個々のルールの精度を表す。サポートは、整合データを対象とする全データ中の割合で示され、対象データ中でのルールの有効性を表す。

(4) 抽出されたルールの検証

抽出されたルールの中で、ルール5はサポートがもっとも大きく、確信度も高いため有効なルールと考えることができる。また、ルールの内容を検討すると、スパンがある程度以上で、交通荷重(年間トン)がある値以下の橋梁にき裂が発生しないことは、橋梁維持管理に従事する技術者の経験と照らし合わせても妥当と判断できる。

ルール2、3を見ると、ルール5とは異なり、交通荷重の少ない橋梁にき裂が発生する傾向が示されている。この傾向は、橋梁技術者の経験・知識に一見矛盾するように考えられるが、ルールの解釈方法により、この矛盾を解消できる。その解釈とは、交通荷重のきわめて少ない線区は閑散線区であり、適切な維持管理が欠落していることである。そのためき裂が発生しやすい傾向にあることは、抽出されたルールや技術者の経験・知識と整合する。

ルール1では、ある特定の図面番号を持つ橋梁にき裂が発生しやすい傾向が読みとれる。このグループは補強桁や明治期に製作されたものを含んでおり、経年劣化が進んでいるものと考えられる。

なお、図面番号の「作」で始まるものは明治30(1897)および35年(1902)に設計されたものである。「達」で始まるものは明治42年(1909)から昭和5年(1930)に設計されたものである。また、「では」、「よはふ」が含まれるものは昭和3年(1928)の鋼鉄道橋設計示方書によるメートル制の桁である。さら

表-3 決定木による予測

対象データ	決定木による予測	
	き裂あり	き裂なし
き裂あり	39	24
き裂なし	4	322

表-4 プロダクションルール

No.	前件部	帰結部
1	(スパン < 9.64) AND (図面番号 ∈ {作35キヨウヨウカ, 作30年, よはふ509-6, よはふ506-13, では809-6, ???131})	き裂あり
2	(スパン < 9.64) AND (図面番号 ∈ {達680, では807-9} AND (年間通トン < 70))	き裂あり
3	(スパン < 9.64) AND (図面番号 ∈ {達680, では807-9} AND (年間通トン ≥ 70))	き裂なし
4	(スパン < 9.64) AND (図面番号 ∈ {トケツ, 達970, 達540, 達1084, では508, 達1084, 達4.5, では816, では808, 806-7})	き裂なし
5	(スパン ≥ 9.64) AND (年間通トン < 1625))	き裂なし
6	(スパン ≥ 9.64) AND (年間通トン ≥ 1625) AND (図面番号 ∈ {曲94, 達680, 達540, 準達680, では819-7-1, では819-2, では815}))	き裂あり
7	(スパン ≥ 9.64) AND (年間通トン ≥ 1625) AND (図面番号 ∈ {曲では864(8)-1, では828-2, では819-6, では816-50, では816, DG831-1, DG825-2}))	き裂なし

表-5 ルールの評価

ルール	ルール 該当 データ	整合 データ	矛盾 データ	確信度 [%]	サポ ート [%]
1	14	14	0	100.00	3.60
2	4	4	0	100.00	1.03
3	8	6	2	75.00	1.54
4	21	20	1	95.24	5.14
5	294	273	21	92.86	70.18
6	25	21	4	84.00	5.40
7	23	23	0	100.00	5.91
計	389	361	28		

に、「DG」で始まるものは昭和31年(1956)の鋼鉄道橋設計示方書によるものである。分岐が図面番号で行われる箇所がいくつかあるが、異なる年代のものを含むグループが生成されており、図面番号による分類の傾向が捉えにくくなっている。そのため、図面番号の区分を大まかにするなどカテゴリの粒度に注意する必要があることがわかった。

(5) データマイニング適用に関する考察

抽出されたルールに関して橋梁技術者による検証によりその有効性を示すことができた。しかし、本研究では、既存のデータベースからデータの欠損や誤りの少ないものを選別してデータマイニングを適用した。そのため橋梁形式として上路プレートガーダー、変状としてき裂発生の有無という比較的小な領域を扱った。今後様々なデータソースに対して、知識抽出の有効性を示す必要がある。

データベース中の欠損や誤りは、データ構造定義の不備に起因するものや、人為的なミスなどの要因が考えられる。しかし、根本的な原因として入力されたデータを検証・再利用するサイクルが存在せず、未入力や誤りが訂正される機会がないことが挙げられる。そのため、本研究で提案するデータマイニングのようにデータを再利用するサイクルが存在すれば、データ検証を行う機会が生まれ、欠損や誤りの少ないデータが整備されることが見込まれる。

抽出されたルールは、確信度やサポートなどの指標によってある程度有効性を検証することができるが、ルールの内容を検証するには専門技術者の協力が必要である。コンピュータによる自動化と専門家による検証を組み合わせた効率的なシステムの構築が、知識抽出の精度・効率を向上させることができた。

6. まとめ

本研究では、橋梁の維持管理業務において情報の共有・再利用に着目したマネジメントシステムについて検討し、プロトタイプを構築した。ユーザ間のアプリケーション・データ共有の実現するためにWebシステムを採用した。構築したプロトタイプは、CAMPサーバと検査支援システム、BridgeML、データマイニングアプリケーションにより構成される。

橋梁目視検査システムは、現場作業に適したクライアント端末としてPDAを採用し、ユーザインターフェースを構築した。これにより現場での情報参照、検査報告の入力が可能となり、情報収集の効率化を図ることができる。

複数のシステム間の相互運用・データ共有を促進し、ネットワークを通じた情報流通を実現するためには、橋梁の維持管理に関するデータ構造を定義するBridgeMLを提案した。BridgeMLでは、複数の出力チャンネルを持つマルチモーダルシステムの構築を行うことができ、プロトタイプとして、HTMLとPOC XMLチャンネルを持つシステムを構築した。

データベースに蓄えられた情報から知識を抽出するデータマイニングを行った。その結果、いくつかのルールが生成され、その有効性を検討した。鋼鉄道橋を対象とし、き裂発生の有無について決定木を構築した結果、いくつかの有効なプロダクションルールを生成した。これらのルールは橋梁技術者の検証が必要であるが、膨大なデータから効率的に知識を抽出する有効性を示した。

データベース活用という観点からデータマイニングを適用する場合、今後の課題として、対象データの獲得、ルールの後処理、ルールの再利用が考えられる。さらに、抽出されたルールを社会基盤構造物マネジメントシステムにフィードバックする機構が必要である。マネジメントシステムにおけるルールの活用方法として、エキスパートシステムと組み合せた意志決定支援や、抽出されたルールを技術者のための教育コンテンツとして利用する方法がある。

謝辞：本研究は鉄道建設・運輸施設整備支援機構「運輸分野における基礎的研究推進制度」の助成によるものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Robert, W.E., Marshall, A.R., Shepard, R.W. and Aldayuz, J.: The Pontis Bridge Management System: State-of-the-Practice in Implementation and Development, <http://aashftware.camsys.com/information.htm>
- 2) Thompson, P.D., Small, E.P., Johnson, M. and Marshall, A.R.: The Pontis Bridge Management System, *Structural Engineering International*, IABSE, pp.303-308, 1998.
- 3) 宮本文穂、河村圭、中村秀明、山本秀夫: 階層型ニューラルネットワークを用いたコンクリート橋診断エキスパートシステムの開発、土木学会論文集, No.644/VI-46, pp.67-86, 2000.
- 4) 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.
- 5) Garret, G.H. Jr. and Smailasic, A.: Wearable Computers for Field Inspectors—Delivering Data and Knowledge-Based Support in the Field, *Artificial Intelligence in Structure Engineering*, LNAI 1454 Smith (Ed.), Springer, pp.146-174, 1998.
- 6) 水野裕介、阿部雅人、藤野陽三、阿部允: 情報技術(IT)援用による橋梁目視検査支援システムの構築、土木情報システム論文集, Vol.9, pp11-18, 2000.
- 7) 矢吹信喜、植田国彦、山下武宣、嶋田善多: 電子タグ、PDA および音声技術を用いた現場点検支援情報シス

- テム, 土木情報システム論文集, Vol.11, pp.77-84, 2002.
- 8) 矢吹信喜, 古川将也, 加藤佳孝, 横田勉, 小西哲司: プロダクトモデルによる PC 中空床版橋の設計照査と概略積算の統合化, 土木情報システム論文集, Vol.10, pp.213-220, 2001.
 - 9) 矢吹信喜, 志谷倫章: IFC に基づいた CPC 中空床版橋の 3 次元プロダクトモデルの開発, 土木情報システム論文集, Vol.11, pp.35-44, 2002.
 - 10) 山崎元也, 本郷廷悦, 千葉洋一郎: Japan Highway Data Model 構築の基礎研究, 土木情報システム論文集, Vol.10, pp.33-42, 2001.
 - 11) 古田均, 木村壽夫, 広兼道幸, 田中成典, 三雲是宏: 橋梁の損傷要因診断事例からのラフ集合を用いたルール型知識の獲得および共有方法に関する研究, 構造工学論文集, Vol.45A, pp.533-541, 1999.
 - 12) 柳原弘之, 倉本和正, 菊池秀明, 中山弘隆, 鉄賀博己, 古川浩平: ラフ集合を用いたデータマイニングによるがけ崩れ発生要因の抽出に関する研究, 土木学会論文集, No.658/VI-48, pp.221-229, 2000.
 - 13) 加賀山泰一, 河村圭, 宮本文穂, 田中信也: ラフ集合の概念による橋梁伸縮継手損傷のルール型知識獲得, 土木学会論文集, No.735/VI-59, pp.157-170, 2003.
 - 14) World Wide Web Consortium, <http://www.w3c.org/>
 - 15) Apache Software Foundation, <http://www.apache.org/>
 - 16) Nishida, T., Fujihara, N., Azechi, S., Sumi, K. and Yano, H.: Public Opinion Channel for Communities in the Information Age, *New Generation Computing*, Vol.14, No.4, pp. 417-427, 1999.
 - 17) Berry, M.J.A. and Linoff, G.S.: *Mastering Data Mining*, Wiley Computer Publishing, 2000.
 - 18) 高坂柴朗: 鉄道防災改良施工法, 三報社印刷, 1955.
 - 19) 小西純一, 西野保行, 中川浩一: 大正・昭和前期における鋼鉄道橋の発達とその現況, 土木史研究, 第 22 号, pp.257-267, 2002.
 - 20) 水野裕介, 阿部雅人, 藤野陽三, Meret, S., 阿部允: データベース技術を用いた社会基盤構造物に関する維持管理データ管理手法の提案, コンクリートの耐久性データベースフォーマットに関するシンポジウム論文集, 土木学会, pp.77-82, 2002.

(2003. 7. 9 受付)

WEB-BASED DATA MANAGEMENT ARCHITECTURE FOR BRIDGES

Yusuke MIZUNO, Masato ABE, Yozo FUJINO, Sandy MERET and Makoto ABE

This paper focuses on a data management architecture that facilitates data sharing and reusing. The architecture mainly consists of three components: an inspection support system that facilitates data acquisition performed by field inspectors, Bridge Markup Language (BridgeML), and a knowledge management application. Two versions of BridgeML specifications and a prototype application enabling a multi-modal access BMS has been developed. A knowledge management application has been developed in order to maintain useful information as a knowledge base and to discover meaningful patterns and rules through the process of exploration and analysis of large BMS data.