

港の基盤・空間デジタル化技術

伊藤 輝

近年、国土交通データプラットフォームなどこれまで蓄積されてきた様々なデータを活用する動きが加速している。また、BIM/CIMによる設計施工の原則適用など取り扱う必要のあるデータが変化している。

筆者らは都市丸ごとのシミュレーション技術研究組合に参画し、DPP（データ処理プラットフォーム）を用いた港湾分野のデータ変換・統合技術の研究開発を行っている。これは、データ変換・統合処理を自動化することにより効率的にデータを扱うことのできる技術である。

本報では、技術研究組合港湾分野のデータ変換・統合技術について3つの取り組みを紹介し、データ変換・統合技術について効果や課題を述べる。

キーワード：DX, デジタルツイン, シミュレーション, 港湾

1. はじめに

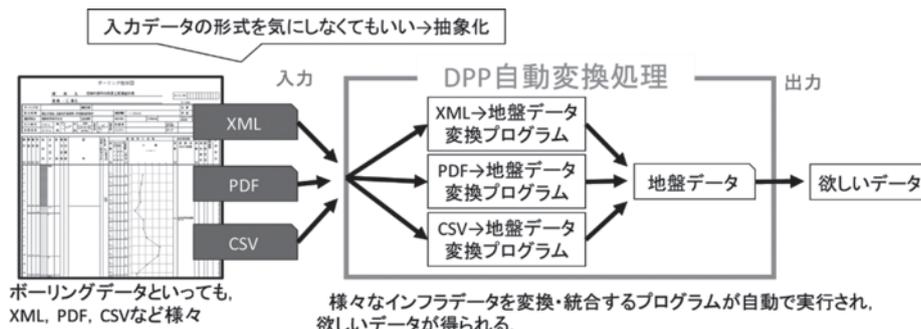
最近、国土交通データプラットフォーム（以下、国土交通DPF）など、電子納品された国有のデータを便利に利用できる状態で公開する動きが加速している。このようなインフラデータは年代、目的などによってデータの記述形式が多種多様である。例えばボーリングデータであれば、アナログデータをスキャンしたPDF形式のデータであったり、最新の電子納品基準を満足するXML形式のデータであったりと記述形式が異なったり、重要構造物付近の表層から最深部まで密にN値を測定したデータ、杭打ちのために支持層とその付近のみN値を測定したものであったりと目的によって持っているデータの質が異なったりする。ボーリングデータのみに着目してもこのように様々な形式・目的で記述されたデータが混在するため、構造物設計や防災・減災シミュレーションのための地震応答解析、津波・高潮シミュレーションを実施する場合、解析担当者はデータの収集・補間、シミュレーションソフト毎に異なるパラメータの計算や、入力データの作成など大きなコストが必要となる。そのため、地震や津波・高潮の重畳といった様々な災害シナリオの考慮や、地震応答解析による防波堤の沈下予測と組み合わせた津波シミュレーションなどの綿密な解析を行って避難計画を立てるなどといった対策は作業コストが高く難しくなっている。また、BIM/CIMを用いた設計施工、維持管理が推進され、デジタルツ

インを用いたシミュレーションの研究が進む中で、これまで蓄積されてきた様々な構造物図面の活用が急務となっている。構造物図面を読み取りBIM/CIMモデルを作成するには、その両方に精通した技術者が小さくない工数をかける必要があるが、今後モデル化が必要となる構造物の数は膨大であり、現実的ではないと思われる。担い手不足の中、このような課題に対応するためには、ベテランや専門的な技術者の技術を扱いやすいプログラムに実装し、多くの技術者が扱えるようにすべきであり、最近ではAIを使った研究が目立っている。

筆者らは、都市丸ごとのシミュレーション技術研究組合（代表：神戸大学）に参画し、DPP（データ処理プラットフォーム）を用いてこれらの様々な形式の様々なインフラデータを効率的に連携し、都市を丸ごとデジタルツインする研究開発を行っている。

2. DPP（データ処理プラットフォーム）

都市丸ごとのシミュレーション技術研究組合では、理化学研究所で開発されたDPP（データ処理プラットフォーム）を基幹技術とした都市デジタルツイン技術の社会実装を目的としている。DPPとは、“データ変換を自動化することにより、データ形式を抽象化する手法及び言語”である¹⁾。DPPの概要を図1に示す。先に示した通り、ボーリングデータは年代・目的によって様々な形式で記述される。DPPのライブ



図一 1 DPP (データ処理プラットフォーム) の概要

ラリとして、読み込んだデータを中間的なデータ（例の場合、地盤データ）に変換するプログラムをそれぞれプログラミングしておくことで、どのような形式のデータを入力しても DPP が自動で適切な変換プログラムを選択し自動変換する。変換プログラムが充実すれば、ボーリング試験のデータであればどのようなものでも入力できるため、データの形式を意識することがなくなり、抽象化されていると言える。変換プログラムは元データからデータを適切に取得するだけでなく、データの加工・補間といった処理も実装される。DPP では、DPP による処理をスクリプトを用いて制御する機能が備わっており、DPP ライブラリの作成者は DPP 利用者が適切にデータの加工・補間・整形が行えるようプログラムを実装している。先に述べたように、スキャンされた PDF データの場合、手書きの数値を読み込むことができず必要なデータが得られない場合など、周囲の情報から適切に補間したり、データの欠落を検出し、プログラムの使用者に判断をゆだねるといった方法をとる必要がある。これらの処理は、土木に関する深い知識（土木知）を持った技術者が DPP のライブラリを記述することで実装が可能となる。このため、都市丸ごとのシミュレーション技術研究組合では IT 業界や大学のほか、ゼネコンやコンサル各社が DPP プログラムを学習し、共同でライブラリを開発している。

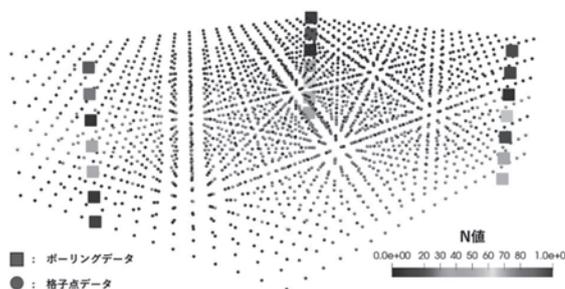
DPP によるデータ変換ライブラリは、ボーリングデータなどを処理する地盤分野のほか、高速道路などの橋脚、河川、埋設管等様々な分野で開発が行われているが、ここでは港湾分野の開発内容を紹介する。

3. 港湾 DX

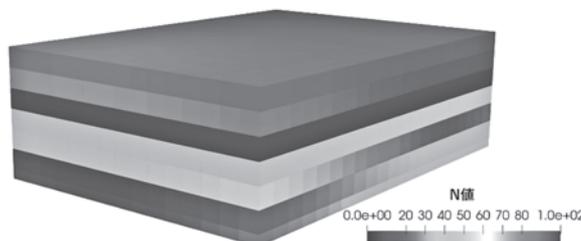
港湾分野の DPP ライブラリ開発について、代表的なものを下記に示す。

(1) 地震応答解析ソフトウェア FLIP の入力データ自動作成

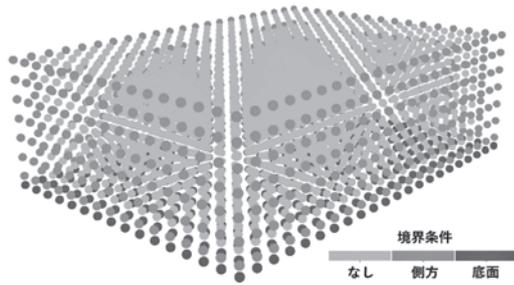
地盤分野では神戸大学が主導して汎用地盤モデル「GridModel」が開発されている²⁾。GridModel を図一 2 に示す。GridModel は N 値などのボーリングデータから補間されたデータが格子状に配置された地盤モデルである。続いて図一 3 は GridModel の格子状に補間されたそれぞれの格子点に対して節点や要素の情報を与えた有限要素モデルである。最後に図一 4 は GridModel に付与された節点情報を可視化した図であり、境界条件で色付けしている。GridModel の格子点にはボーリングデータから補間された N 値、土質区分などのデータと、これらのデータから計算された数値解析用の土質パラメータが設定されている。FLIP で利用できる地盤モデル用のパラメータも可能なものは自動で計算されるほか、DPP スクリプトを用いてパラメータを直接指定することも可能である。計算されたパラメータや有限要素モデルは FLIP でそのまま利用できる入力データとして出力することができる。



図一 2 GridModel



図一 3 GridModel から作られた有限要素モデル



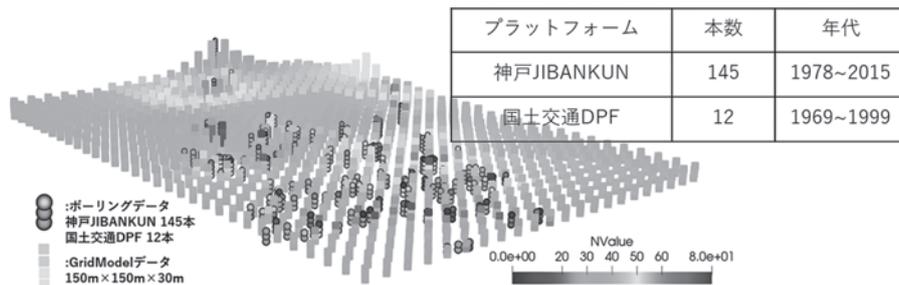
図一4 境界条件パラメータ

図一5に神戸市灘区のボーリングデータを用いて作成したGridModelを示す。DPP・GridModelを用いたボーリングデータの読み込み及び地盤モデルの作成は、フォルダに国土交通DPFからダウンロードしたXML形式のボーリングデータを配置し、DPPスクリプトを読み込むことで簡単に行うことができる。また、図一6に示すような有限要素モデルも自動で作成され、有限要素解析ソフトFLIP用の入力データが出力される。図一7は出力された入力データを用いて解析を試行した結果である。

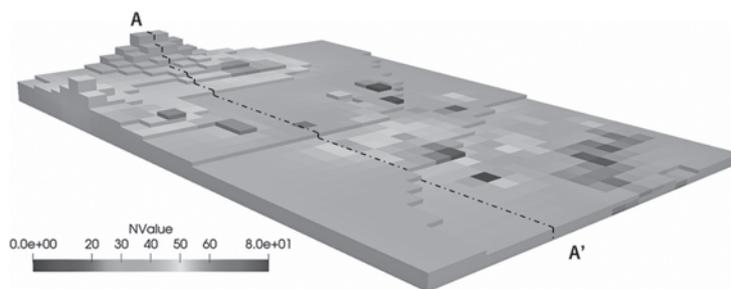
(2) 津波・高潮シミュレーションの合理化

津波・高潮シミュレーション用の入力データを効率的に出力するためのDPPライブラリ開発について示す³⁾。設計実務で津波・高潮シミュレーションを実施する場合、対象となる領域（設計対象の構造物が設置される領域など）は津波・高潮の影響する範囲と比べるとごく狭い領域となる。そのため標準的な津波・高潮シミュレータでは、日本列島を含むような範囲が広く、粗いメッシュの領域から、徐々に狭く詳細な領域へと計算範囲を区切る（ネスティングする）ことで計算コストと計算精度を確保している。このとき、詳細で狭い領域は現地で取得した地形データなどを利用することとなるが、その他の広範囲のデータはG空間情報センターなどで公開されているデータを使用することが多い。本DPPライブラリでは、設計実務でよく用いられる「内閣府 南海トラフの巨大地震モデル検討会」のデータ（以下、検討会データ）を用いて津波・高潮シミュレータ向け入力データを作成する。

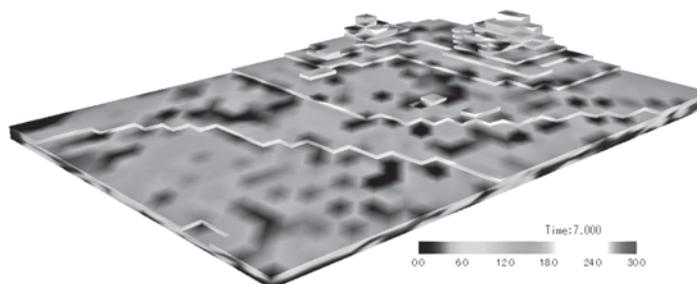
図一8にライブラリの処理フローを示す。検討会



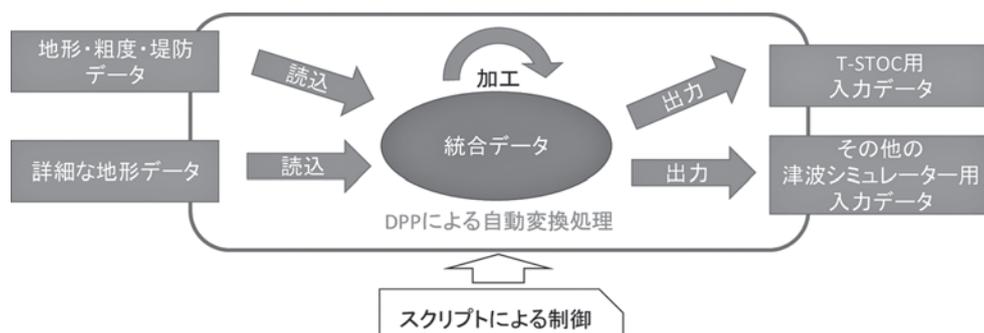
図一5 神戸市灘区のGridModel



図一6 神戸市灘区の有限要素モデル



図一7 神戸市灘区の地震応答解析試行結果



図—8 津波高潮シミュレーション向け DPP ライブラリの処理フロー

データは、その他の津波・高潮シミュレーションの入力データとして作成されたものではないため、使用するシミュレータ向けにデータの大幅な加工、整形が必要となる。本システムは、港湾空港技術研究所で開発された津波高潮シミュレータ STOC の入力データを標準として出力できることを目標に開発されているが、将来的に各社で様々に使われているシミュレータの入力データを出力できるよう、できるだけ汎用性を持たせて開発が行われている。DPP ライブラリとして実装されている本システムは、DPP 上でスクリプトを使って制御可能である。検討会データを読み込んで中間データを作成・加工し、各種シミュレータ向けに出力される処理はすべてスクリプトによって制御される。スクリプトの命令文には、STOC 向けの入力データを出力する命令のほか、地形データなどを確認するため可視化ソフトで閲覧できる形式のデータを出力する命令、解析条件パラメータを変更したりする命令が実装されている。その他、STOC による解析を実施するためには必要となるデータの加工命令が実装されており、各領域の境界部分の地形データの変更により整合性エラーが出ないようにしたり、解析領域の自動分割を命令として実装し必要であれば計算コストを低減できるような機能追加を行った。このようにすべての加工作業を自動化することではなく、スクリプトを用いて実施する命令として実装することで作業を省力化するだけでなく、技術者が高度な処理を行える高度化を実現できるように開発が行われている。このため、専門家が作成したスクリプトを使ったり、アドバイスをすることで専門的な知識を持たない自治体等で入力データを作成したりすることができる。その他、地震発生時にスクリプトが自動で処理を開始するように設定しておき、発生した震源の位置によって適切な津波モデルを選定、入力データを作成して STOC によるシミュレーションを実施し、結果データを自動で変換して適切なプラットフォームに送信することで被害の推定に利用したりできる。

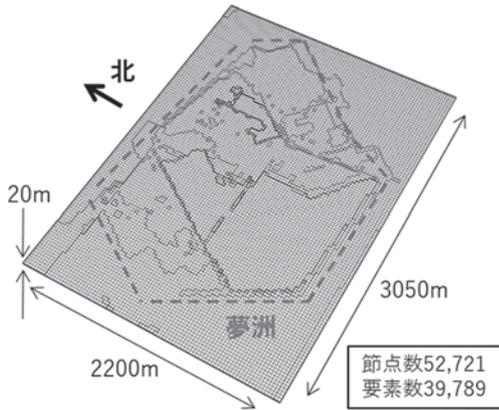
表—1 に本システムを用いた場合の津波・高潮シミュレーションの入力ファイルの作成日数と、現行の作業日数の比較を示す。現行の作業日数が約 17 日間の作業を必要とするのに対して、DPP を利用する場合はスクリプトの作成時間である 1.6 日間と大幅に短縮される。また、スクリプトを再利用、あるいは多少のパラメータ変更のみの場合、DPP によってデータが処理される時間は 1 分程度となる。そのため、様々な条件でシミュレーションを行いたい場合、特に手作業で変更することが難しいパラメータがある場合には大きなコストダウンとなる。

図—9, 10 に大阪府大阪市此花区夢洲付近のボーリングデータを用いて DPP で自動作成した有限要素モデルと、同じく夢洲付近の地形データを示す。一般的に地震応答解析を行う場合、地形の座標は原点付近に設定するが、DPP ライブラリではボーリングデータに含まれる緯度経度などの座標情報を持っているため、検討会データと位置が整合する(図—11)。このため、地震応答解析の結果である沈下情報をそのまま津波・高潮シミュレーションの地形データに反映させることが可能となっている。また、システムの開発が進むことで対応する地震応答解析ソフトが増加すれば、港湾構造物が設置された地盤は FLIP、高速道路盛土などは DACSAR の解析結果を反映させるなど、様々な分野で信頼されているソフトウェアを連携させることが可能である。これまで、地震後の防波堤や重油タンクの被害、堤防の被害が津波被害にもたらす影響が議論され、これらを連成する解析手法が提案されるなど研究開発が進んでいるが、実用化には至っていない。しかしながら、FLIP や DACSAR などの異なる分野で信頼されている解析技術と津波シミュレーションを連携させることで、ある程度の信頼性を確保しつつ急務となる災害対策を進めることができると思われる。また、入力データ作成コストが低減したことにより、これまで防波堤が健全か完全に消失したかの極端な設定で行わざるをえなかった津波・高潮シミュ

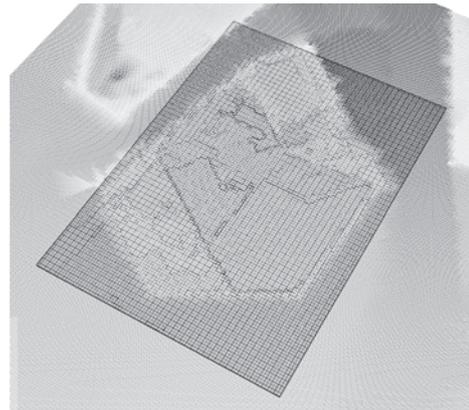
表一 1 DPP と現行作業の日数比較

項目	作業内容	現行 (日)	DPP利用 (ms)	DPP利用 (日)
計算条件	内閣府「南海トラフの巨大地震モデル検討会」のデータあるいは「報告書・成果品」のデータ読み込み	1.5	10497	
	領域の接続関係の定義 (data.ini)	0.1	4	
	解析条件ファイルの作成 (Area)	3.8	32333	
	計算ケース名の出力	0.1		
	計算格子データの設定	2.0		
	分割領域の設定	0.1		
	形状データの設定	0.1		0.1
	時間積分の制御情報の設定	0.1		0.1
	使用するモデル・パラメータの指定	0.1		0.1
	流体の物性値の設定	0.1		0.1
	境界条件の設定	0.5		0.5
	初期条件の設定	0.1		0.1
	行列ソルバーのパラメータの指定	0.1		0.1
	想定する台風情報の設定	0.5		0.5
再現計算モデルの構築	地形・形状データ (Area.str)	10.5	97	
	解析領域のX, Y, Z方向のセル数設定	1.5		
	計算セルか否かを表すフラグの設定	1.5		
	各セルの有効体積率の設定	1.5		
	X, Y, Z方向の面透過率の設定	1.5		
	海底面のZ座標値の設定	1.5		
	水位の設定	1.5		
	マニングの粗度の設定	1.5		
計算の実施	ネスティング計算時の地形の不整合によるエラー訂正	1.0	9791	
合計		16.9	52722 ≒53秒	1.6

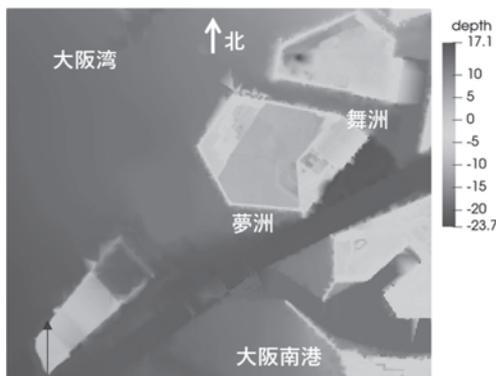
() 内はスクリプト作成時間を含む場合の合計



図一 9 大阪府大阪市此花区夢洲付近の有限要素モデル



図一 11 有限要素モデルと地形データの整合



図一 10 大阪府大阪市此花区夢洲付近の地形データ

(3) 二次元港湾構造物図面の三次元モデル化

国土交通 DPF など公開されるデータの中には、電子納品された CAD 図面データなども含まれる。このような CAD 図面を三次元化し、デジタルツインが構築できれば、各種災害シミュレーションなどに役立つと思われる。また、BIM/CIM による設計・施工・維持管理が推進される中で、図面データの効率的な三次元化は必要な技術である。特に港湾分野では、既存の港湾構造物の延伸・改良など旧構造物の図面をもとに設計を行うことが比較的多いため、効率的な三次元モデル化技術の需要が高まっているものと思われる。

DPP において、理化学研究所にてこれまでに高速道路橋脚の二次元 CAD 図面から三次元モデルを出力するプログラムが開発されている^{4),5)}。CAD 図面データは、線や点、文字列の集まりであり、専門的知識が

レーションから、地震による被害を考慮したより経済的に優れたシミュレーションを多シナリオで実施・比較検討したり、アンサンブル予測を実施することが可能になる。

あれば構造を読み取ることが可能であるが、プログラムでは線や点・文字列の位置情報やレイヤー情報などしか読み取れず、構造を判読することは困難である。DPPでは橋脚の二次元CAD図面を読み取るプログラムを開発する際、データ変換・統合技術を活用して線や点、文字列の集まりから図を推定する機能が実装されている。港湾構造物図面の読み取りに必要な処理と橋脚の図面の読み取りプログラムは共通する部分が多くあるためこれらを利用して開発を行っている。

DPPを用いた二次元図面の三次元化技術は、特徴として図面から取得したデータをナレッジグラフと呼ばれる一種のデータベースとして保持することがあげられる(図-12)。ナレッジグラフでは、“港湾構造物”といった広い概念のデータから混成提、ケーソン、ケーソンの高さ等のパラメータへとより具体的にデータを関連付け、木構造のデータベースとして保存する。ナ

レッジグラフは図面からデータを取得するたびにこの木構造にデータの追加や変形等の操作することで構築される。このため複数の図面からデータを読み取り木構造を適切に発展させることで、施工区域全体あるいは港湾全体をデータベース化することも可能となる。

データを出力する際にも、ナレッジグラフを活用することで様々な要求を達成することが可能である。ナレッジグラフは自然言語類似の表現によってデータにアクセスすることが可能になっている。例えば図-13のナレッジグラフに対して“港湾構造物の名前が*工区ケーソン”であるケーソンの高さ”をリクエストすれば、“12.1m”の数値データにアクセスすることができる。データへのアクセスだけでなく、“港湾構造物のケーソン”でアクセスできるデータに対して三次元モデルの出力命令をすれば、適切な形式の3Dデータが得られる。図-13~15にテストモデルと

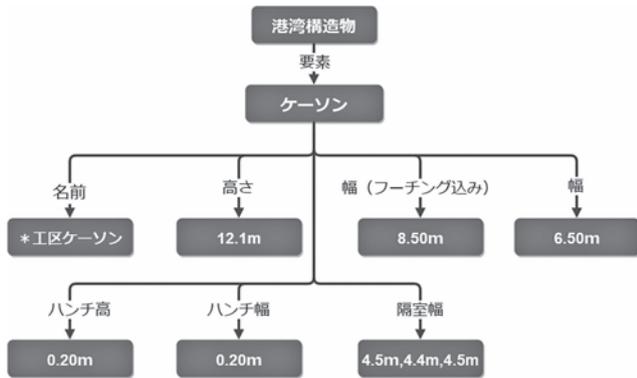


図-12 ナレッジグラフ



図-14 BIM/CIM用の詳細なモデル

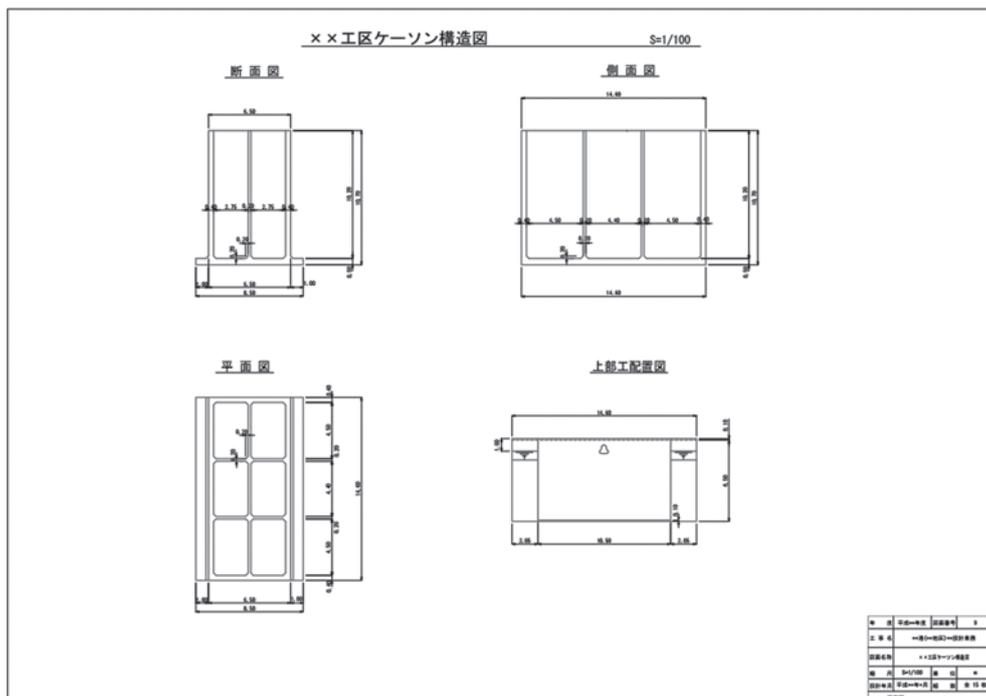


図-13 電子納品基準を満足するケーソン構造図 (隠滅処理済み)



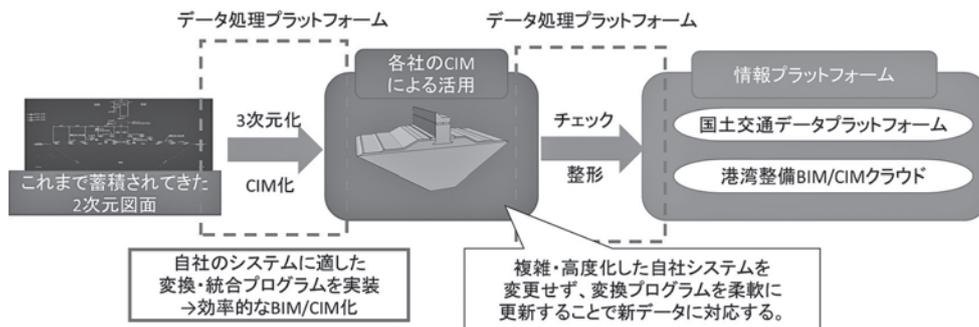
図一 15 地震応答解析用の三次元モデル

して用意したケーソン構造図と三次元モデルの出力結果を示す。三次元モデルは BIM/CIM モデルとして利用できる詳細なモデルと、地盤も含めた地震応答解析に必要な十分なモデルを出力することができる。これらは、先に述べたデータのアクセス方法を用いて詳細モデルと地震応答解析用モデルを選択することができる。

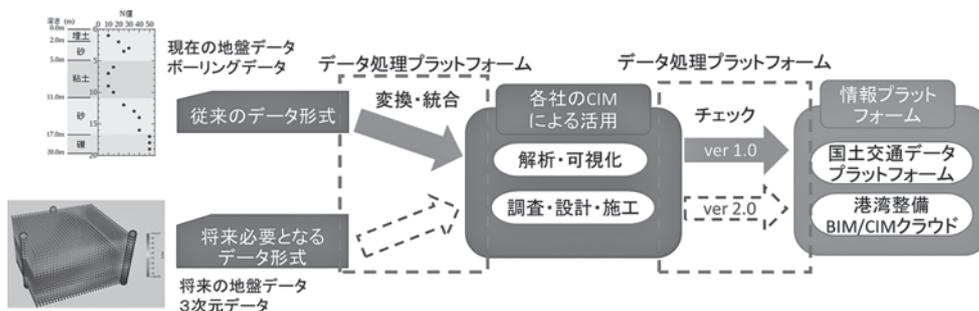
これらの図面読取・出力技術は発展途上であり、現状対応できる港湾分野の図面の種類は少ない。先行している高速道路橋脚の分野では、橋脚の配筋図を読み取って三次元モデルとするなど研究が進んでいる。港湾分野でも、平面図など広い範囲の図面だけでなく、配筋等の詳細なモデルを出力するために必要な図面など対応を広げたい。

4. データ変換・統合技術と CIM

構造物図面などの三次元化技術について、非 BIM/CIM データを BIM/CIM 化する技術を研究・開発することで企業にとってどのような便益があるか述べる。図一 16 はこれまで蓄積されてきた図面と、各企業が持つ設計・施工・維持管理システムと情報プラットフォームとの関わりである。まず、これまで蓄積されてきた様々な分野の構造物図面は BIM/CIM が推進されることにより BIM/CIM 化加工が必要なデータになった。また、納品先のプラットフォームはこちらも同じく BIM/CIM データによる納品が求められる、実際に港湾分野では港湾整備 BIM/CIM クラウドの整備が進められている。その中で、各設計・施工・維持管理企業は複雑・高度化した自社システムを持っており対応が急務となる中、人手不足や労働時間規制など条件は厳しいものとなっている。3章で述べた構造物図面の三次元化技術は現状、詳細モデルや地震応答解析用モデルの2つの出力先を実装しているが、各社が持つ設計・施工・維持管理システム向けの出力を実装することで、自社システムを維持しつつ対応可能であると考えられる。また、納品においてもこれらのデータ変換技術を取り入れることで、社外秘の情報をシステム的に取り除いたり最新の納品基準を満たすかどうか自動でチェックすることができる。図一 17 には、さらに周辺環境が変化する場合の対応を示す。今後新たな



図一 16 データ変換・統合技術と情報プラットフォームの関わり



図一 17 入出力情報の発展とデータ変換・統合技術

計測技術やデータの蓄積方法が考案されて扱うデータが追加されたり、提出方法や基準が変化しても、データ変換・統合技術を持っていれば機能追加で対応可能である。

データ変換・統合技術を持つ大きな便益として、データの標準形式に縛られないといった点があげられる。例えば、今後 BIM/CIM が標準となっていく中で BIM/CIM 向けソフトウェアでそのまま地震シミュレーションを行うなど、BIM/CIM と親和性の高い解析手法が台頭すると思われる。しかし日本で主に信頼され、伝統的に使われている解析手法で BIM/CIM を意識したものは少なく、海外の手法に置き換わっていく可能性も少なくない。データ変換・統合技術を用いれば、BIM/CIM 等の標準形式は抽象化された形式の一つにすぎない。解析手法でいえば、BIM/CIM データから自動で入力データを作成したり、出力データを BIM/CIM データに自動で変換するプログラムを開発することで、伝統的手法も両立が可能である。これにより、BIM/CIM に親和性の高い手法から伝統的な手法まで多様な選択肢を保持できるほか、新たなシステム整備を行うコストを削減することができる。

5. 課題

これまでデータ変換・統合技術を学習し、港湾分野でライブラリとして実装してきた中で見えた課題を整理する。

まず、土木の知識に優れ、プログラムとして実装できる人材が少ないことがあげられる。DPP によるデータ変換・統合技術は、その特殊な設計から土木技術者には難度が高く、この技術を使いこなす情報工学の人材は土木の知識を持たないため、柔軟な実装が困難である。そのため両方の技術を持った技術者の育成が必要なことである。データ変換・統合技術はその性質上、変換プログラムが多様化すればするほど便利になっていくが、技術者の数が少ないことからプログラムの充実とは遠くなっている。

次に、データへのアクセス難度が高い点である。国土交通 DPF によりデータベースにアクセスしやすく

なったり新たなデータが公開されてはいるが、途上であり十分にプログラムの開発を行えるほどは充実していない場合が多い。特に、構造物図面の三次元化においては顕著で、技術研究組合に参加している設計会社の厚意で図面データを得ているのが現状である。本来であればケーソン構造物一つとっても様々な表記ゆれやデータの欠損などプログラムにて対応したい事象は様々に存在するが、図面数が少ないため比較検討しプログラムに落とし込む作業が実施できずにいる。

6. おわりに

都市丸ごとのシミュレーション技術研究組合の港湾分野で研究開発が行われている港湾 DX 技術を紹介したほか、データ変換・統合技術について述べた。今後も精力的に研究開発を進め、社会実装など進めていきたい。

JICMA

《参考文献》

- 1) 大谷英之：記述形式の自動変換に基づく異種データ連携における型定義の自動化に関する研究，地理情報システム学会講演論文集，No.28, ROMBUNNo.F-5-4, 2019.
- 2) Takeyama, T. O-Tani, H. Oishi, S. Hori, M. and Iizuka, A. : Automatic Construction of Three-dimensional Ground Model by Data Processing, Transaction on Mechatronics, Volume : 26, pp.2881-2887, 2021.
- 3) 伊藤輝，竹山智英，大谷英之：地震応答解析と津波シミュレーションの入力データ自動構築と連携システムの開発，土木学会論文集 B3 (海洋開発)，78, pp.L_889-L_894, 2021.
- 4) 大谷英之：自然言語類似の情報表現を媒介とする異種データ連携における統合データとしてのナレッジグラフ自動構築手法の検討，人工知能学会第二種研究会資料セマンティックウェブとオントロジー研究会，2022 卷，SWO-058 号，pp.12-01-pp.12-04, 2022.
- 5) 大谷英之：土木構造物設計図面からの 3 次元モデル自動構築におけるナレッジグラフの利用，人工知能学会第二種研究会資料セマンティックウェブとオントロジー研究会，2022 卷，SWO-057 号，pp.08-01-pp.08-06, 2022.

【筆者紹介】

伊藤 輝 (いとう ひかる)
東洋建設㈱
土木事業本部 総合技術研究所 鳴尾研究所
地盤防災研究室
研究員

