

河川 CIM/3D ベースの河川設計・管理の実践的アプローチ

山梨大学大学院総合研究部 地域防災・マネジメント研究センター 助教 大槻 順朗

要 旨

本論文では、実用上の必要性を踏まえた考察を含め、河川への CIM 導入と標準化に向けた新しい概念、事例を紹介する。まず、CIM を導入することによって克服すべき河川の設計・管理上の課題を共有する。次に、河川 CIM の導入に関わる多自然川づくり志向の先駆的な事例を示す。最後に、技術的な状況や実践的な取り組みに基づき、河川のための CIM における地形のデータフローの要件を標準的な施工段階とあわせて考察する。

1. はじめに

CIM (Construction Information Management) は、3 次元のデジタルモデルによる相互情報管理による土木管理技術である。もともと海外の BIM (Building Information Management) から出発した概念であり、日本でも最近では BIM/CIM という言葉も使われるようになったが、ここでは CIM と統一して称する。CIM は、コラボレーションとコミュニケーションの改善、正確な見積もり、調整の改善、衝突の検出、リスクの軽減、コストの削減、スケジュールの改善、建設現場の安全性の向上、施設管理の効率化などが期待されている¹⁾。その実現には、調査(測量)、設計、施工、維持管理の一貫する 4 つの建設フェーズすべてにおいて、建設に関連する物理構造物の 3D デジタルモデルの活用が求められるが、データ、計算、技術的な制約から、依然としてその潜在能力を十分に発揮できていない。また、CIM の特徴であり目的となる複数、相互、および分野間のコラボレーションに対しては、社会的・制度的な障壁がその実現を阻んでいる。

河川事業における CIM は、ダムなどの構造物には進捗しているが²⁾、河道掘削や浚渫などの土工については世界的にも進んでいない。国土交通省の示すマニュアル³⁾では堤防の構築に適用範囲が限定され、水路整備、生態系機能の回復・維持の推進など、総合的なマネジメントに活用されているケースは未だない。国際的

な CIM コンソーシアムである BuildingSMART International のインフラ分科会でも、水路としての基本的な標準線形モデルの議論しかされていない⁴⁾。我が国では、CIM による生産性向上プロジェクトを「i-Construction」と名付け、2025 年までに 20% の生産性向上を目指している⁵⁾。世界的にみれば日本は歴史的に多くの深刻な洪水災害を経験している一方で平時は浅く、透明度が高いため、空中レーザ測深 (ALB: Airborne LiDAR Bathymetry) などの新しい技術の導入に適していることから、この分野の世界的なトップランナーになりうる素地があり、実際にすでにそうなっている分野もある⁶⁾。

本論文では、実用上の必要性を踏まえた考察を含め、河川の CIM 導入と標準化に向けた新しい概念、事例を紹介する。まず、CIM を導入することによって克服すべき河川の設計・管理上の課題を共有する。次に、多自然川づくり志向の CIM の先駆的な事例を示す。最後に、技術的な状況や実践的な取り組みに基づき、「河川のための CIM」における地形のデータフローの要件を、標準的な施工段階とあわせて考察する。

なお、ここでの議論は、一般財団法人 日本建設情報センター (JACIC) 社会基盤情報標準化委員会河川 CIM 標準化検討小委員会 (委員長: 小林一郎 熊本大学名誉教授) における議論をベースに一部付け加えたものであり、より詳細には小委員会の成果報告書⁷⁾を参照されたい。

2. 多自然川づくりにおける課題

地形、生態系、文化などが複雑に関係する現実において河川デザインを決定することは、厳密な解のある問題ではなく、複数の目的を満たしうるよりよい解を探索することである。そのためには、図 1 に示すように、河川のデザインは、一度のアクションではなく、本来双方向の反復プロセスとなっているべきで、専門家や関係者と協議しながら、何度も評価と修正を繰り返し、ブラッシュアップしていく必要がある。新たな概念やツールはこの理想の実現に近づくものとなることが期待され、CIM の導入は、この状況を根本的に改善するはずである。しかし、どのような特徴を CIM の枠組みで扱うべきか検討の必要がある。検討は、CIM としてのデータマネジメント上の課題に留まらず、よい川を現実世界に創るために必要な根本的な課題にまで言及する必要がある。

2.1 3Dベースの河川地形設計ツール

まず重要なのは地形モデルの編集である。現在の CIM では、構造物のモデリングを主な対象としているため、CAD (Computer-Aided Design) が中心となるソフトウェアである。CAD は、構造物や工業製品に求められるような厳しい設計値に耐えうる均一な面で構成された物体を設計するのに適したツールであるが⁸⁾、自然で複雑な川のような不規則な地形のデザインには必ずしも適していない。実際の設計では、道路設計と同じように直線的で望ましくない形状が河川に適用されている⁹⁾。地形モデリングは、土木設計以外にも、水理学的シミュレーションや GIS (Geographical Information System)、CG (Computer Graphics) などの多様な用途と目的に応じて TIN (Triangulated Irregular Network)、ラスタ、計算格子などの異なるスタイルでモデリングされてきた⁹⁾。また、地形モデリングでは、現状の地形形状の再現にとどまらず、それを地形形状として適切な形で編集できることが必要である。デジタル地形編集ツールもモデルのスタイルに応じて異なり一長一短があるが、これらのツールを組み合わせることで、3D CAD 単独よりも望ましいモデルが出来上がる。彫刻が様々な形状の彫刻刀によって



図 1 目指すべき河川設計の理想の概念図

形成されるように、業界標準の CAD 以外の様々なツールが、河川設計の分野で広く採用され、ツールがスムーズに連携するようになることが求められる。

2.2 環境評価ツール

河川設計の評価ワークフローにおいては、洪水調節の評価が一義的に重要であるものの、洪水調節と地形的な持続性や生態学的な機能性を含む環境河川設計の両方を実施することが必要である。従来の1次元計算のみによる評価ではなく、3次元地形データと平面2次元解析により、地形形成や瀬淵の分布など、特に浅い川では高度な環境評価が可能となる場合が多い¹⁰⁾。このような生態系評価コードやフレームワークは様々なレベルの複雑なものが数多く存在し、その中から選択することができる。例えば、無料の平面2次元水理解析ソフトウェアの iRIC Software (<https://i-ric.org/ja/>) には環境評価ツールである EvaTRiP Pro が利用可能なソルバとして含まれている。同ソフトに含まれる水理解析ソルバから得た水深と流速値を利用し、瀬淵環境の簡易的判別などを実施することができる¹¹⁾。水環境の変化を見落としなく完全に把握し評価することは実際上困難であるが、一部だとしても定量的評価を実施する意義は大きく、設計判断の重要な指標になる。当然ながら、完成したあとの失敗から学ぶよりはコストは低い。

2.3 高性能なビジュアライゼーション

詳細で正確なビジュアライゼーションは、非定量的な景観や水辺の活用の評価など、プロジェクト開発の複数の段階で必要不可欠である。従来の 2 次元的図面では設計された空間がどのようなものになるのか、人は視覚的に理解することができない。たとえエンジニアやデザイナー同士でも、専門性や計画段階によって、設計された河川景観の捉え方に違いがあることが多い。Schultz(2020)¹²⁾は、共創的な方法で川辺のデザインを成功させるための重要な要因として、「歩くこと」、「空間の類型(タイプ)を見つけること」、「空間ビジョンをデザインすること」を挙げている。したがって、現実世界と同じように強力に可視化され、さらに歩き回ることができる 3D デジタルモデル空間(近年では、メタバース(Meta-verse)とも呼ばれる)から、本質的な洞察を施工の前段階で得ることができる。重要なのは、このモデルを使ってステークホルダーが個別の想像ではなく、同一の視覚的イメージを共有し、同時に歩くことさえでき、設計コンセプトの開発と改善に積極的に関与することができる点である¹²⁾。例えば、図 2 は、マルチプレイヤーゲーム「レッド・デッド・オンライン」(<https://www.rockstargames.com/reddeadonline/>)内の仮想のオワンジラ・クリークに集い、小川を歩きながらその自然の特徴を議論するという、仮想上の出来事ではなく現実の出来事である。これらのゲーム製作にも用いられているゲームエンジンは、リアルな 3 次元空間製作のためにデジタルアセットとして利用可能な無料のライブラリが充実している。デジタルモデルは、最新の 3D フィールド作成ソフトウェアを使って、利害関係者の入力に基づいて、即座に、簡単に、そして視覚的にわかりやすく修正することができる。これは、CIM 導入の大きなメリットであるフロントローディングによる設計段階の効率化¹³⁾に直結している。

2.4 設計における固定概念

河道の設計対象は、単純な幾何学的構造物ではなく、複雑な地形なのである¹⁴⁾ということを再認識する必要がある。図面や水理計算の便宜のために、複雑な河川地形は単純化され扱いやすくなった代償として、人工的な河川空間や単調な生物生息域が生み出されてきた¹⁵⁾。



図 2 最近のビデオゲームにおける空間構築のリアリティと双方向性

つまり、ツールの柔軟性や技術的な便宜が向上しても、必ずしも現実世界を改善しないことに注意を払う必要がある。例えばランドスケープアーキテクチャーと呼ばれる技術者など、複雑な地形をゴールとする技術者もいるが、多くの河川設計者、科学者、管理者、行政担当者は複雑な自然の特徴を設計することに慣れていない。従来の河川の概念整理や分析から、私たちは無意識のうちに河道を面的に分割し、川幅や河積などのパラメータだけで見てしまっている。このような断面的思考は、その有用性を念頭におくとしても、河川環境・河川景観の創造においては根本的な制限であり、本質的に捨てなければならないものである。

2.5 河川管理を包含する CIM 導入と運用

構造物の CIM は、モデリング対象が特定されていることを前提に、3D モデリングによる設計・施工が中心であることが多い。これに対し、河道には管理対象が多い(水路、堰、水門など)ため、基本的にモデル化する対象が多いことになる。また、河川には多種多様な管理目的(洪水防御、環境維持、施設維持など)がある。さらに、河道地形は形状が変化しやすく、静的な構造物とは根本的に異なる。そのため、構造物の建設に CIM の概念をそのまま適用するだけでは、河川管理に必要なワークフローを満たすことができない。

国土交通省近畿地方整備局福井河川事務所は河川 CIM の枠組み(図 3)を独自に考案している。この構想において、河川管理の各要素である「調査」「計画」「設計」「積算」「施工」「維持管理」が整理され、さらに「環境

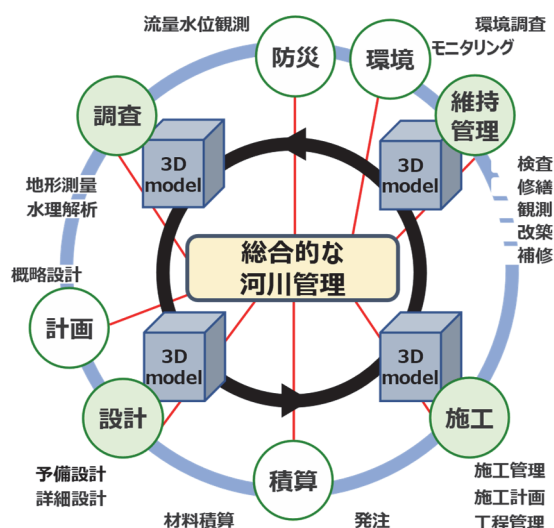


図3 新しく構築された河川 BIM の概念図
(山本ら¹⁷⁾を元に筆者作成)

管理」,「危機管理」(ソフト対策)が追加されている。これまでの CIM の議論では, 単一工事ベースの単純な生産性しか語られない傾向があったため, これらが位置づけられ, 多目的な「河川管理」が根幹であることが明示された。また, 重要なのは, モデルを静的に中心にしておくのではなく, 目的(河川管理)に応じてモデル形状が変化していきながらダイナミックに管理される点である。

この変化をデータ循環として実現することが河川への CIM によって達成され, 段階から段階へのワークフローに沿ったデータの分断を解消した新たなデータの循環を実現する必要がある。先に述べたように構造物 CIM では IFC5.0 などの国際規格が検討され基本的な枠組みはほぼ完成しているが, 河川 CIM のとりわけ地形モデルの取り扱いに関して具体的な標準が検討されていない。具体的には, 転送するモデルの種類(点群, TIN, ラスター DEM など)やデータ形式(.LAS, .LandXML, .TIFF)などの, モデル詳細, データ形式の規格を検討することが課題である。

また, 調査・設計・施工・維持管理の各段階におけるモデル運用で, 一貫した PDCA (Plan-Do-Check-Act) サイクルで示されることが必要である。河川の 3 次元データに関する標準化・ガイドラインは調査・施工段階での

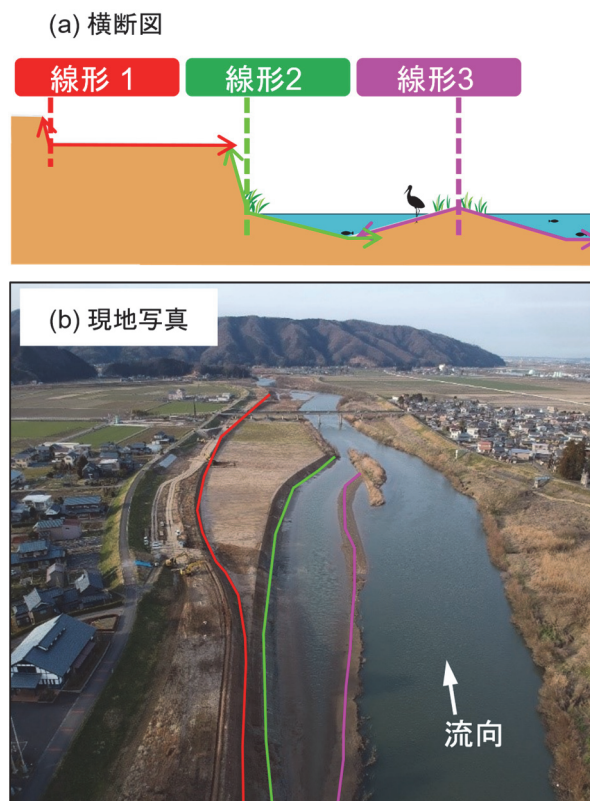


図4 3D CAD による河川治水対策と環境創出の例

記述にとどまっており, 明確な PDCA サイクルのデータの流れを示しているのは, 地すべりのガイドライン¹⁶⁾のみである。CIM をこのようなデータベースとして運用するためには, データ運用のための相互理解, 適切な管理ルール, 運用プロセスをどのように定義するかがポイントになる。具体的な課題や利用可能な技術は地域や国によっても異なるため, アプローチもある程度個別化されることになる。また, 誰が管理するかという問題もある。CIM はプロジェクト内の施工段階で継続的に行われる必要があり, さらにプロジェクト間(あるいは異なる請負業者間)でも継続的であるべきである。

3. 先進的なケーススタディ

3.1 九頭竜川における河川 CIM の概念構築

国土交通省近畿地方整備局福井河川国道事務所は, 河川整備に CIM の考え方を初めて導入した¹⁷⁾。河道の流下能力を高めるための河床掘削工事において, ALB による 3 次元 CAD と 3 次元測定の結果を用いて

湿地帯を設計した。ICT 機械を用いて施工した(図4)。このプロジェクトの先進的な特徴は ①河川地形の 3 次元設計, ②調査・設計・施工・点検・維持管理の各フェーズにおける連続的なデータフローの有効性の検証, ③治水事業の設計に環境修復を取り入れたことである。

対象は九頭竜川支流の日野川における河道掘削事業である。最大 2,800m³/s の洪水流下を実現する河道掘削にあわせ、福井県のコウノトリ放鳥事業に関連して、生態系ネットワーク構築のための環境整備事業としてコウノトリが生息できる湿地帯の創出が検討された。

2. 5で示したように、河川管理の特殊性から、構造物 CIM をそのまま適用することはできないと考えられ、図 3 に示す河川 CIM の暫定的枠組みが地元の行政、設計技術者、施工者が参加する研究会から独自に検討された。このプロジェクトでは、ALB 技術により測量した点群データから作成したフィーチャを CAD で修正することで 3 次元設計が行われた。生態学者の意見を参考に、湿地の形状は、自然の中洲の形状を保全しつつ水位が変動しても湿地の深さがコウノトリの餌場となるように 1:20 と穏やかな横断勾配で設計された。地形面は 3 次元 CAD (Autodesk 社, AutoCAD Civil 3D) を用いた Corridor Modeling により設計・生成された。Corridor Modeling 自体は均一な面を生成する手法であるが、図 4(a), (b) に示すように、隣接する 3 つの面を合成することで、縦横断方向に変化する地形モデルを作成することが確認できた。

合成された TIN サーフェスは ICT 建設機械で利用できるように LandXML 形式(TIN)で出力され、設計コンサルタント経由で建設会社に貸与された。施工の前段階として、施工会社は LandXML データの検証を行った。施工会社から設計図書に求められた意見として、(i) 現場位置を特定できるように設計段階で使用した線形データに記載すること、(ii) 河川を中心線が記載されていること、(iii) 点群から生成した現況地形と生成された地形との間にジャムがあるためスムージング処理が必要、という点だった。施工者からは、3D モデルを施工に直接貸し出すことで、従来の 2 次元の図面ではイメージしにくかった現場がイメージしやすくなり、生産性が大幅に向上したとのコメントがあった。また、小さな問題では

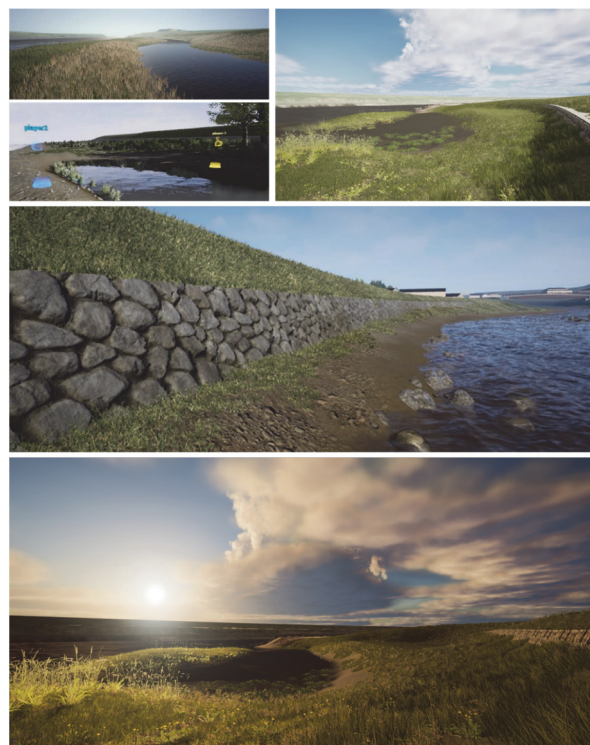


図 5 ゲームエンジンによる空間構築の例

あるが、入力された TIN が ICT 機械のバケット幅より小さい三角形を含んでいると、ICT 建機の動作処理に時間がかかることが分かった。いくつかの問題は発生したものの、すぐに修正でき、設計から得られた 3 次元モデルを施工用の ICT 機械に取り込む、という調査→設計→施工のデータフロー上の根本的な問題は解決できた。

3. 2 ゲームエンジンを用いた川づくり

強力なモデル可視化性能を持つゲームエンジンの登場は、多様なステークホルダーによる川のイメージ共有とデザインモデルの景観評価に大きな影響を与える可能性がある(図 5)。企画の初期段階からゲームエンジンを使用することで、テクスチャ技術を含むモデルレンダリングを利用し、より少ない労力でほぼ完全な表現を実現することが可能になっている。これらのソフトウェアは CAD 同様、習得するのにある程度の時間を要するものの、土木分野のみならずゲーム部門からも技術者の供給が可能であり(実際に建設コンサルタントの中にはゲーム部門から技術者を得た会社もある)、ゼロから学び、適切なデジタル資産(植生、動物、土壌/底質、水の物理など)を入手できる広範なオンライントレーニング資源

とマーケットプレイスが存在する。

土木分野では、CIM モデルの可視化品質を向上させるためのツールとして、ゲームエンジンが注目されている。ゲームエンジンは、CAD とは異なり、自然な形状表現に優れた地形エディタ機能を提供することで、実社会における設計ツールとして活用できることが分かってきた。代表的なゲームエンジンである Unreal Engine (現在の最新版は ver.5) を例にすると、高さデータの仕様はグラフィックスに通常用いられる PNG 形式のラスターデータであり、GIS や CAD ソフトで使用されているデータ形式 (GeoTIFF など) とは異なるが、プラグインを用いて容易に変換することができる。さらに別のプラグインを用いて国際的な 3D マッピング プラットフォームである Cesium (<https://cesium.com/>) のデータを Unreal Engine にインポートすることで、遠景を広範囲に渡って直接モデリングすることなく利用可能である。また、水流を表現するための水理計算結果やマテリアルをプラグインで統合することで、瀬や渦などの詳細な流れのレンダリングも可能である。2020 年からリリースされた Unreal Engine 5 からはより幅広い用途に対応するため、点群データを正式にサポートした。

河川工事への適用も進んでいる。九州地方整備局九州技術事務所では、2017 年の九州北部豪雨災害の災害復旧や、2022 年の山国川水辺周辺の都市計画設計において、ゲームエンジンを初めて実務活用した。新しい河道の掘削による景観の激変を、管理者・設計者・住民が同じ画像でインタラクティブに検討できることを明らかにした。この検討に用いられた高さマップ変換用の QGIS で動作するプラグインは九州技術事務所 HP を通じて公開されている¹⁸⁾。何らかの高さデータを所持していれば (あるいは国土地理院から DEM データをダウンロードすれば)、すぐに地形を Unreal Engine に取り込み作業を体感することができるだろう。

4. CIM による河川の設計フレームワーク

4.1 ワークフロー

円滑なデータフローの形成のためには、設計、施工、保守など各段階において、許容されるデータの要件を

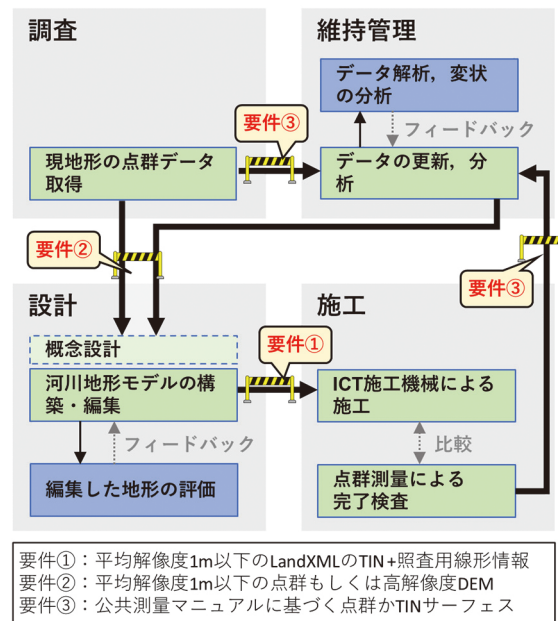


図6 各段階での3次元地形データのフローとデータ転送要因

設定する必要がある。プロジェクトは、調査(測量)段階で取得されたデータ、または維持管理段階でストックされたデータから開始される。そのデータをもとに、プロジェクト前のベースラインとなる地形モデルを作成する。この地形モデルは、可視化され、初期段階の概念設計に用いることが想定される。

次に、地形モデルを編集して具体的な形状を設定する。その後、様々な角度から評価・再編集を行い、モデルのブラッシュアップとそれに基づく意思決定を行う。デザインは寿命の可能性、生態学的便益、財政的コストについて可能な限りテストされるべきである。

施工段階では、3D モデルに基づく半自動施工が行われる。施工後は、設計モデルと現況測量点群との比較により施工結果を確認する。施工された点群データは、管理段階に送られ、理想的には永続的に保存される。このデータは、定期的な再調査とともに、保全活動の必要性を分析するために使用される。

4.2 データ処理に関する要件

ここでは、河川管理の実情に応じた実現可能性を踏まえて、河川の CIM におけるデータ管理について考察する。1 級河川で ALB を用いて取得したデータの蓄積を想定し、水平解像度の観点から必要なデータを検討

する。河川の各工事段階における CIM データ運用案の詳細を図 6 に示す。ただし、ここではすでにマニュアルの整備されている築堤工事は除き、河道内の工事運用に限定して議論する。堤防の設計や幅の狭い河川 (30～50m 未満) では、より高いレベルの詳細度が要求される。日本での現状と先進的な実装の経験から、ワークフローの一貫性とデータの流れをスムーズにするために、各段階で受け入れられる以下のような具体的なデータ要件を設定する必要があることがわかった。ここでは、設計、施工、保守の 3 つの入力要件について説明する。

施工段階での要件は、ICT 建設機械の標準フォーマットとなっている LandXML 形式の TIN が実際上最も強い制約となる。施工時間ロスを軽減するためには 1m 以上を目安に TIN を構成する必要がある。照査に必要な線形が含まれることが必要である。設計段階では、上流側からデータを受け取り、上記のデータ要件を満たす必要がある。受け取る地形モデルとしては、水平解像度 1m が標準となろう。公共工事測量マニュアルでも航空レーザ測量で 1 点/m² となっている。実用化研究による検討から、堤防を除く河川での施工は、一般的に 1m の解像度で十分であると考えられる。維持管理段階では、取得した地形モデルを管理し、地形変状の検出を含む物理的・生態的な性能評価のための解析を行う必要がある。データセットは、データ転送や解析を容易にするために、1m 程度の空間分解能の DEM に変換する必要がある。国の河川管理における 3 次元データ活用マニュアルでも、日常的な管理には 1m の DEM を使用することが示されている¹⁹⁾。点検測量で航空測量が入り込めない水中部分は、ICT 機械に蓄積されたバケット位置のログデータから補完することも可能であり、小規模なプロジェクトでは、施工に使用した LandXML の TIN サーフェスを使用してもよいかもしれない。ただし、公共測量マニュアルに記載されている方法とは異なることに注意が必要である。

5. おわりに

本報告では、3 次元ベースのモデル化と運用による川づくりの高度化、効率化を目指した河川 CIM の現場

導入を目指し、先駆的に取り組んでいる実践例を踏まえて、実務上遂行可能な 3 次元での河川整備を議論した。まず、河川分野で解決すべき多自然川づくりにおける課題を整理し、そこから期待される 3 次元地形の設計法と運用上の課題を述べた。次に、先駆的に行われた 2 つの事例を紹介し、課題と導入の効果を明らかにした。これらを前提として、河川 CIM 導入についての全体の枠組みとデータ運用要件について議論した。

謝辞: 研究の一部は、JACIC 社会基盤情報標準化委員会 河川 CIM 標準化検討小委員会の予算で行われた。委員会において中心的に議論に加わった小林一郎名誉教授 (熊本大学)、中村圭吾氏 (公益財団法人リバーフロント研究所)、山本一浩氏 (八千代エンジニアリング株式会社)、佐藤隆洋氏 (日本工営株式会社) および Prof. Gregory Pasternack 氏 (UC Davis) に謝意を申し上げる。

参考文献

- 1) Hall, J. : “Top 10 Benefits of BIM in Construction”. Autodesk Inc., San Rafael, CA. (2018). <https://bim360resources.autodesk.com/connect-construct/top-10-benefits-of-bim-in-construction>
- 2) Sari, Y. C., et al. : Building Information Modeling (BIM) for dams-literature review and future needs. In *Journal of the Civil Engineering Forum*, 6(1), 61-68 (2020).
- 3) 国土交通省: BIM/CIM 活用ガイドライン(案) 第 2 編 河川編 (2021). <https://www.mlit.go.jp/tec/content/001395886.pdf>
- 4) 矢吹信喜: 土木計画学に関連する CIM 関係の国際標準化及び海外の動向. 土木学会第 53 回土木計画学研究発表会 (春大会), No.06-08 (2016).
- 5) 国土交通省: i-Construction の推進 (2020). <https://www.mlit.go.jp/common/001149595.pdf>
- 6) 中村圭吾: 河川 CIM で進化する多自然川づくり. RIVER FRONT, 88, 18-21 (2019).
- 7) 中村圭吾ら: 河川 CIM 標準化検討小委員会 成果報告書 (2021).

- https://www.jacic.or.jp/hyojun/2019shouiinnkai03_result.pdf
- 8) Brière-Côté A., et al.: Comparing 3D CAD Models: Uses, Methods, Tools and Perspectives. *Computer-aided Design and Applications*, 9:6, 771-794 (2012).
- 9) Brown, R. A., et al.: How to Build a Digital River. *Earth-Science Reviews*, 194, 283-305 (2019).
- 10) Pasternack, G. B., et al: Backwater Control on Riffle Pool Hydraulics, Fish Habitat Quality, and Sediment Transport Regime in Gravel-bed Rivers. *Journal of Hydrology*, 357 (1-2), 125-139 (2008).
- 11) 土木研究所: EvaTRiP Pro User's Manual (2021).
<https://i-ric.org/webadmin/wp-content/uploads/2021/04/manual-2.pdf>
- 12) Schultz H.: Tools for Designing Riverscapes Creatively. Walk! Find Typologies! Design Spatial Visions!. In *Water-Related Urbanization and Locality*. Springer, Singapore, 205-208 (2020).
- 13) 矢島和美: 建設現場のイノベーションを目指して「施工部門が 3D 化する本格的フロントローディングの実践」. 電気設備学会誌, 33(6), 396-399 (2013).
- 14) Laub, B. G. et al.: Range of Variability of Channel Complexity in Urban, Restored and Forested Reference Streams. *Freshwater Biology*, 57(5), 1076-1095 (2012).
- 15) Brooker M. P.: The Ecological Effects of Channelization. *The Geographical Journal*, 151(1), 63-69 (1985).
- 16) 国土交通省: CIM 導入ガイドライン(案) 第 9 編 地すべり編 (2019).
<https://www.mlit.go.jp/common/001289037.pdf>
- 17) 山本一浩ら: グリーンレーザ (ALB) を用いた河川測量の試み. 河川技術論文集, 23, 293-298 (2017).
- 18) 国土交通省九州地方整備局: DX を用いた川づくりの推進 ～全国初! ゲームエンジン・VR を用いた新たな合意形成～ (2022).
https://www.qsr.mlit.go.jp/site_files/file/n-kisyahappyou/r3/21121502.pdf
- 19) 国土交通省: 河川管理用三次元データ活用マニュアル (案) (2020).
https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/kasen/pdf/3jigen_manual.pdf