特集≫≫ 河川・ダムの治水対策，維持管理，点検補修

デジタルツイン建設工事監理における自動・自律 UAV の活用事例

小 俣 光 弘

建設労働人口の減少下における効率的な建設事業監理は我が国の重要命題である。このため BIM/CIM の有効活用により，建設プロセスを変革する取り組みが進められている。一方で，設計データを施工時及び維持管理に効果的に活用する手法は広く浸透しておらず，特定の工種でのみ利用される傾向がある。

本稿では，ダム建設事業内で施工方法の改善を図るとともに，BIM/CIM 及びデジタルツイン技術を一気通貫で活用し，工事及び管理の生産性を高めた事例を紹介する。また UAV の効果的な利用について，データ活用だけでなく自動・自律の運用方法も含めて報告する。

キーワード：建設 DX，ダム，BIM/CIM，デジタルツイン，CPS，自動・自律運転，タワークレーン，UAV

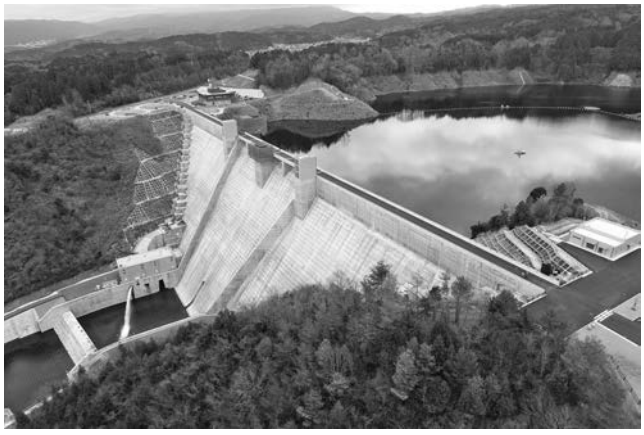
1. はじめに

コンクリートダムは 1 枚の壁のように見えるが，15 m 毎に区切られた柱の集合体である。スランプ 3 cm のダムコンクリートを大型のバイブレータで締固め，柱を建設していく。国内のダム建設はこのような柱を 1 つずつ作り上げ，ダムを完成させる柱状工法に始まった。近年は複数の柱を同時に施工する面状工法による合理化施工方法が開発・導入されている。一方，ダムは施工をしていく幅と長さが変化していくため，頂部の狭い範囲では型枠・支保工などの工事量が増え，技能労働者の配置や施工方法に大きな変化が生まれる。

このため，数少ないダム経験者が施工計画及び現場監理を統括し，工事全体での標準化と平準化をはかり，ICT 技術を効果的に活用することで，現場の安全・効率・品質を満たすことが求められている。

2. 工事諸元と工事の特徴

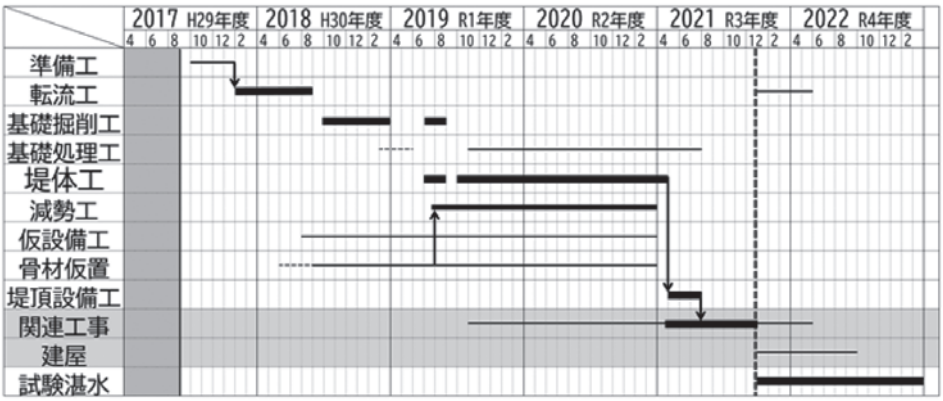
川上ダムの全景写真を**写真**―1 に，工事概要を**表**―1 に，工事工程表を**図**―1 に，打設進捗図を**図**―2 に示す。川上ダムは三重県伊賀市に建設された中規模の重力式コンクリートダムである。打設期間は 19ヵ月で 2021 年 4 月 20 日に無事打設完了し，試験湛水を同年 12 月に開始した。この工事は掘削開始から試験湛水開始までを約 3 年という短期間で行う必要があり，短い工期設定に対応した高速施工と施工量平準化



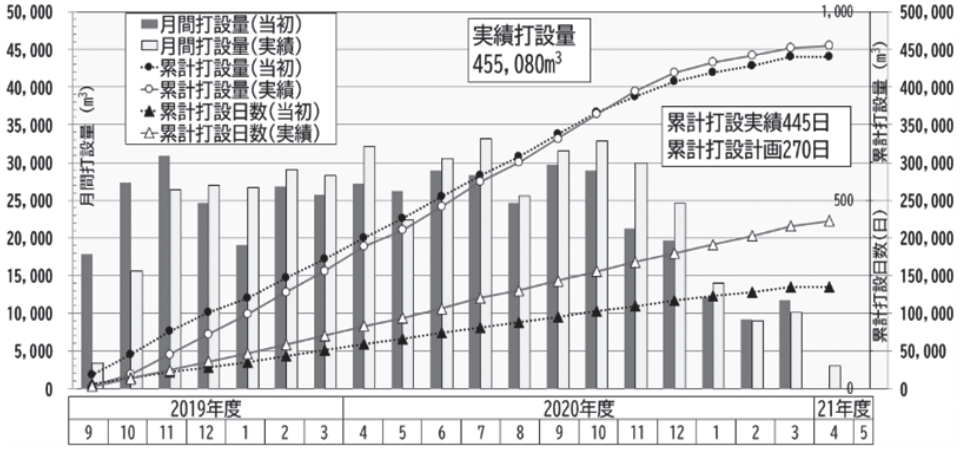
写真―1 川上ダム全景

表―1 工事概要

工事名称	川上ダム本体建設工事
発注者	㈱水資源機構
施工者	大林・佐藤・日本国土特定建設工事共同企業体
施工場所	三重県伊賀市阿保地内他
工期	2017 年 9 月 21 日～ 2023 年 3 月 31 日
主要工事数量	堤体基礎掘削工： 土石 118,400 m^3　岩石 49,410 m^3　合計 167,810 m^3 堤体コンクリート工：455,080 m^3　減勢工：17,690 m^3 左右岸端部処理工：1,681 m^3　合計 474,451 m^3 基礎処理工：カーテングラウチング 9,266 m コンソリデーショングラウチング 3,090 m
ダムおよび貯水池 諸元	型式：重力式コンクリートダム 堤高：84 m（堤頂標高 EL282.0 ） 堤頂長：334 m 湛水面積：1.04 km^2 総貯水容量：31,000 千 m^3



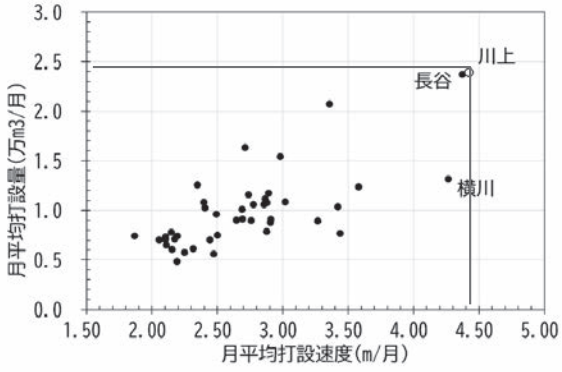
図―１　工事工程表



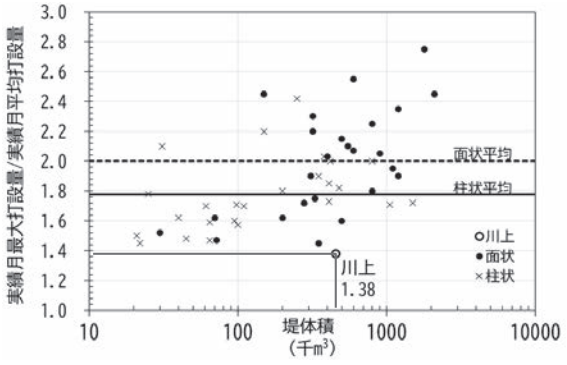
図―２　打設進捗図

の両立を達成している。

また，高さ 4.5 m/ 月に及ぶ ELCM（面状工法の手法，拡張レヤ工法）の国内最速施工を，河床部から頂部までペースを緩めることなく継続する一方，コンクリート製造用の骨材は全量購入であり，地元に配慮した骨材運搬量の制約（180 台 / 日）が求められた。このため，貯水池内に約 45 万 t の粗骨材を事前仮置きして計画的に消費する必要があり，打設ピーク速度の抑制が要求された。ダム建設において，堤内構造物が少なくなる標高や，降雨が少ない施工しやすい季節に打設量を稼ぐことが一般的常識である。このため，川上ダム本体建設工事は【ELCM 最速工程と平準化の両立】という矛盾への挑戦であった。本工法による打設速度を１ヶ月あたりの打設高および１ヶ月あたりの打設量とで表すと**図―３**[1] のようになり，月平均打設量・打設高ともに川上ダムが最速である。また，月最大打設量を月平均打設量で除したものは平準化率[2] と定義され，機械の専門書でも設備最適化の概念として取り扱われている。堤体積に対する平準化率を示す（**図―４**）。ここに川上ダムの実績をプロットするとその値は柱状工法と面状工法いずれの施工実績と比較し



図―３　ELCM での月平均打設速度と打設量[1]



図―４　堤体積に対する打設量の平準化率[2]

ても最も平準化された数値であることが確認できる。高速施工のダムだけでなく，稼働率を高めて仮設備の経済性を優先したダムと比べても平準化された数値であると言える。

3. 従来施工技術の見直しによる標準化施工

川上ダム本体建設工事では主に以下の 3 点を標準化することで施工の平準化を達成した[3]。

(1) ELCM（レヤ工法）採用による天候・季節変動対応

ELCM は RCD 工法（コンクリートを振動ローラで締め固めるダム建設工法）に比べ天候・気候への適応に勝る工法である。打設時の許容最大降雨量はそれぞれ，4 mm/h と 2 mm/h である。更に，川上ダムでは ELCM の中でも拡張打設（extend）しないレヤ工法を基本とすることで，打設時の施工管理範囲を縮小した。打設設備は能力を 1.7 倍に増強した最大吊上げ荷重 25 t のタワークレーンの直接打設に限定し，中規模以上のダムで一般的な堤体内でのダンプ運搬を行わず，レヤ工法で各ブロックを確実に打設完了した。コンクリートの受け渡し回数と運搬時間を減らすことで，施工時に降雨があってもコンクリート品質を損なわない施工が行え，打設可能日数が当初計画の 270 日から 445 日と飛躍的に増加した。これにより予定通りの工程を消化することで，骨材安定消費と労務安定の平準化を達成した。

(2) 施工 CIM の高度利用による手戻り防止[4]

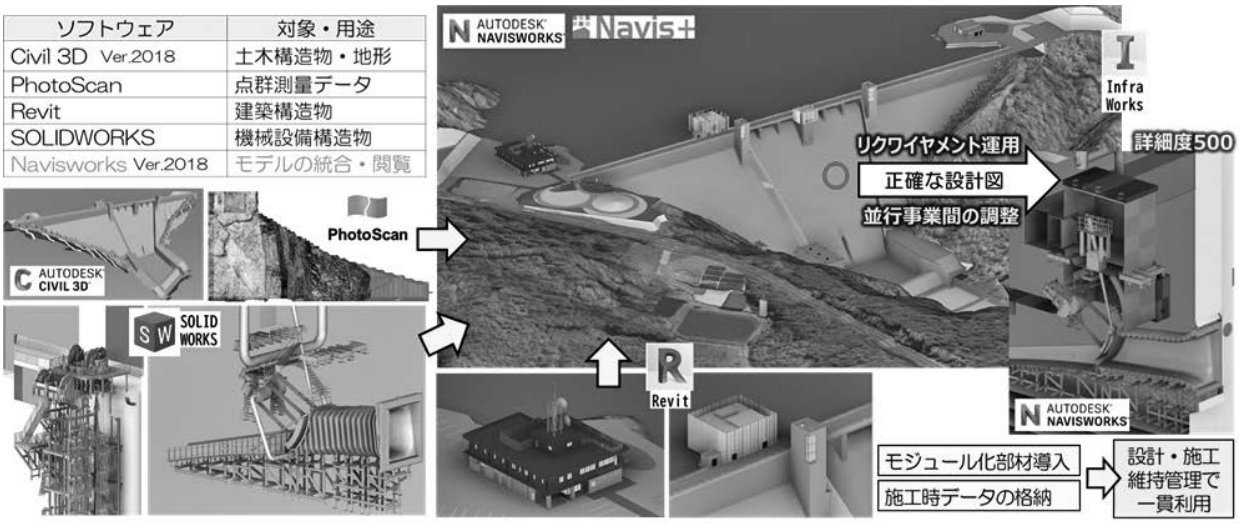
国交省では令和 5 年 BIM/CIM 原則適用の方針の下，推進委員会により活発な議論を行っている。川上ダム本体建設工事ではこの流れに先立ち，施工詳細度を高めた CIM を【施工 CIM】として施工 JV 主導で運用した。合理的な施工を進めるのに必要なのは正確な設計図である。

ダムの設計図は変更が多い。例えば，ダムサイトは強固な岩盤が求められるが広い範囲の詳細調査は難しく，掘削後に地質と岩級を考慮した設計形状の変更が高確率で実施される。また，ダム本体はコンクリートと機械設備の複合構造であり，鋼構造である機械設備は一般に別途発注となり，詳細設計が開始されるのが本体工事に比べて遅れる。このため，相互の干渉チェックが施工直前となるが，躯体と鋼構造の設計思想も異なるため，図面照査と干渉回避，現場合わせの労力が大きい。川上ダム本体建設工事ではこれらの詳細設計のリクワイヤメント（要求事項）を受注者側から提案して設計にフィードバックすることで図面を修正し，事業工程の円滑化を図った。異なる CAD データを専用ソフトウェアの NavisWorks で合成した統合モデルを示す（**図**―5）。このような CIM 活用のリクワイヤメントが設計の初期段階から組み込まれ，適切に運用されれば生産性を大きく向上させることが可能となる。

(3) 堤内構造物のフルプレキャスト化による構築負荷低減

前述のようにダムは構造が複雑で標準化しにくい範囲も多く，一般にプレキャスト化の範囲は限定的である。川上ダムではこのような堤内構造をほぼ 100％プレキャスト化している。CIM を活用して複合構造部の設計を明確にし，機械設備のアンカー等を組み込んだモジュール部材として製造することで，通常であれば型枠・鉄筋の構築待ちが発生する部分の工程を大幅

ソフトウェア	対象・用途
Civil 3D Ver.2018	土木構造物・地形
PhotoScan	点群測量データ
Revit	建築構造物
SOLIDWORKS	機械設備構造物
Navisworks Ver.2018	モデルの統合・閲覧



図―5 CIM による事業全体の監理

に短縮した。また，これにより熟練作業員がいなくても複雑な構造部の施工が可能となった。プレキャスト化が標準設計となり規格化されれば，設計業務の軽減にもつながり建設プロセス全体の生産性が向上する。正に設計のフロントローディングを行ったと言える。これからの建設 DX に必要なのは ICT 技術の開発・活用だけでなく，それらを活かすための正確な CIM というプラットフォームであり，アドリブ的な現場合わせを必要としないリクワイヤメントを意識した明確な設計思想と情報共有のデータベースとしての CIM の管理・活用なのである。

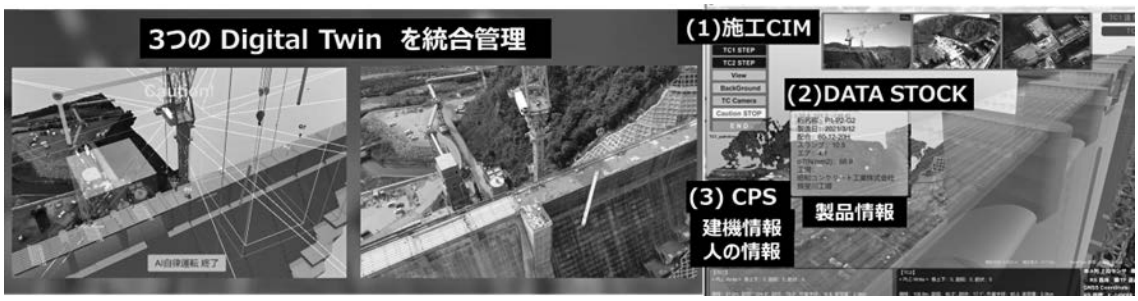
4. デジタルツインを用いた現場監理と，建機遠隔化・自動化・自律化への発展

国土交通省が示すインフラ分野の DX アクションプラン[5] では個別施策を 3 つの柱で構成し，手続きのデジタル化，情報の高度化と活用，現場作業の遠隔化・自動化・自律化の実行計画が取り纏められている。令和 4 年度以降は，Society5.0 であるデジタルツインの実現を目指し，取組の深化，分野網羅的，組織横断的な挑戦を掲げ，インフラの作り方，使い方，データの伝え方の変革を進めていく方針となっている。この取り組みは複雑な建設プロセスを X（トランスフォーム）し，最適な建設手法についての議論を行うことが前提である。なぜなら，大量のデータの優先順位を自律的に解析することは難しく，人間が最初に行う条件設定が建設 DX を進める鍵だからである。

このような建設 DX のネクスト・ステージを目指し，川上ダム本体建設工事では前述のように施工を最適化した上で現場を CIM でデジタルツイン化した。設計の詳細度を上げると共に，時間軸，製品情報なども含んだ 5D で監理した。更に，この CIM と AI を利用したタワークレーンの自動運転を現場導入し，任意点へのコンクリートバケットの連続運搬と，指定点へのプレキャスト部材運搬を行った。前述のように川上ダム本体建設工事では施工のトランスフォーメーションが行われており，施工方法が標準化され単純であるため，クレーン操作に複数の機械との連動を考慮したパラメーターの設定が必要ない。コンクリート打設時にクレーンと合わせて動く機械はバイバック 2 台とトランスファーカのみと最小化されているため，自動化の比率を高めることが比較的容易であり，デジタライゼーションの促進につながっている。まず，最適な建設手法をしっかりと選択しておくことで，デジタル技術導入にあたり人間が決めなければいけない『ハイパーパラメータを最小化』し，デジタル技術導入のハードルを低くしているのである。このように導入したデジタルツインを，川上ダム本体建設工事では 3 つの方法で定義している。1 つ目が正確な設計図である施工 CIM，2 つ目が出来形・品質情報の格納場所としての DATA STOCK，3 つ目がセンサー情報から機械や人の動きを反映する CPS である。統合ソフトである NavisWorks で作成した正確な図面を活用し，管理情報を同時に CIM 上に表示することで，現場の施工状況も含めたデジタルツイン監理を実現した（**図―6**）。これまで示してきたように，設計段階で構築された CIM を施工及び維持管理に一貫して利用する事が可能となった。この取り組みには，データストアのラベル付けや格納情報等を，発注者・設計者・施工者の 3 者で明確にして共有することが大事である。また，コントラクターの枠を超えて，CIM モデラーとコーディネータを監理する施工者側の CIM マネージャの存在が不可欠であると言える[6]。

5. 建設 DX に向けた自動・自律 UAV 監理の導入

現場を効率的に監理するには，目となるカメラや計測機器の活用が必要となる。当社では，現場監理の遠隔化を目指し，UAV を活用した様々な取り組みを進めている。本節では UAV の遠隔化や自動化，自律飛行により取得したデータを活用したデジタルツイン出来形管理について紹介する。



図―6　デジタルツイン現場監理（3 つのデジタルツインの統合）

(1) UAV による様々なデータ取得

UAV 測量が一般的になり久しいが，モデルの作成には様々な手法があり，用途に応じて利用する事で建設時の管理に幅広く活用できる。一般的には 2D キャプチャを行い，オルソ画像や点群を作成することで，ダム工事のような広域も俯瞰的に把握する事が可能である。最近は，様々な角度から撮影した画像から 3 次元モデルを作成する SfM（ストラクチャフォームモーション）技術も進展し，これまで UAV 測量が苦手であった立体的なモデルの作成も可能となってきている。また，360° パノラマ合成写真などを UAV 撮影と組み合わせて時系列で記録することで，工事の定点観測や安全パトロールなどを容易にする取り組みも進んでいる。

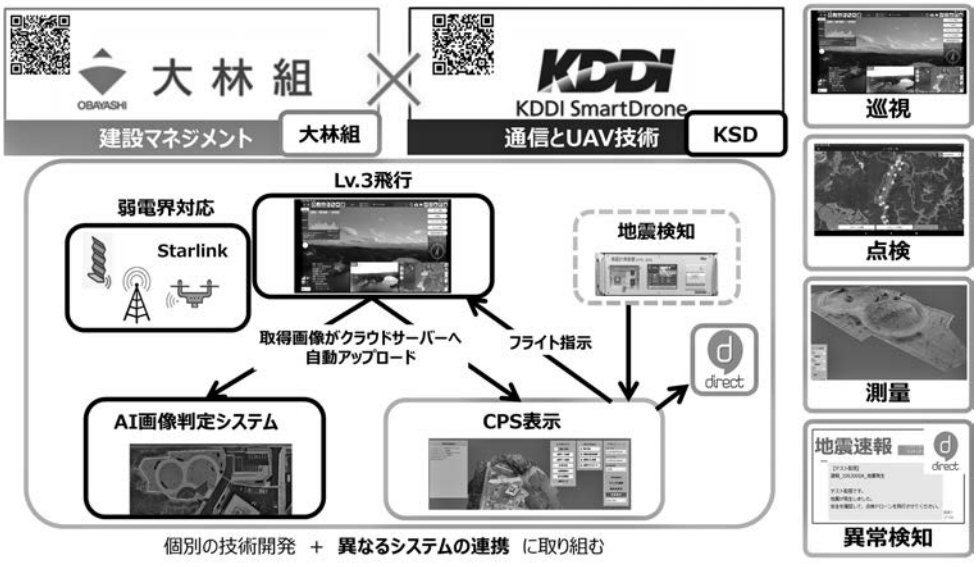
(2) UAV 目視外無人飛行 Lv.3 の自動化への取組 [7)]

これまでの UAV の操縦は操作者の目視内に限られていた。2022 年 12 月に目視外飛行である Lv.3, 4（**図―7**）を進める規制緩和が実施された。この法令改正に合わせて，目視外飛行（Lv.3）による UAV 遠隔監理技術の開発を令和 4 年度の PRISM で実証した [8)]。ダム現場は貯水池まで含めた管理範囲が広く，川上ダムであれば 1.0 km^2 である。この面積は東京ディズニーランド 2 個分以上となる。このような広大な建設現場監理を，耐水・耐粉塵性を備えたポート付き UAV の遠隔運行により監理した。また，LTE 通信によりリアルタイムに飛行状況の安全確認も行いながら UAV を制御した（**図―8**）。

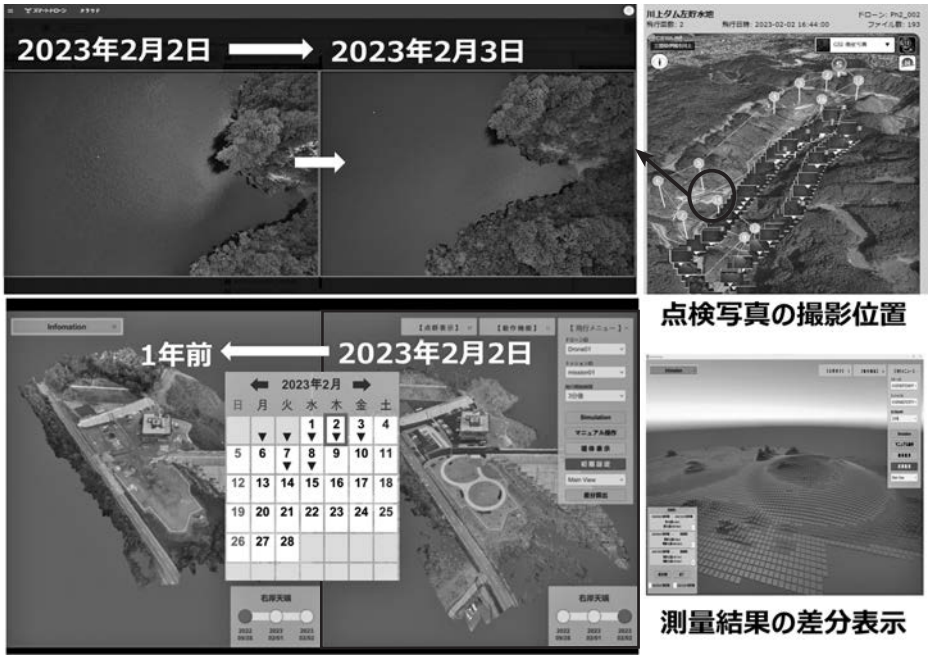
このシステムは大林組と KDDI スマートドローンの協業により，前述の CIM をベースに 2 社のシステムを API で連携している（**図―9**）。一部山間部の弱

図―7　UAV 操作の段階（Lv.1 ～ 4）

図―8　ポート付 UAV とフライト制御機構



図―9　PRISM で実証した UAV の統合管理システム



図― 10　点検・測量の実施結果と時系列表示

電界エリアもあったが，Starlink 基地局を配備する事で安定した通信を確保し，UAV による定時の遠隔自動巡視・点検・測量と地震に対応した緊急飛行が行える事を実証した。取得したデータを基に，時系列での対比や数量算出等を行える機能も実装し（**図**― 10），デジタルツインによるサイバー空間での現場監理を高度に行うことが可能となった。この技術により，現場監理業務が 20％程度に圧縮できる可能性が示された（**図**― 11）。

(3) 自律飛行 UAV によるデジタルツイン出来形管理 [9)]

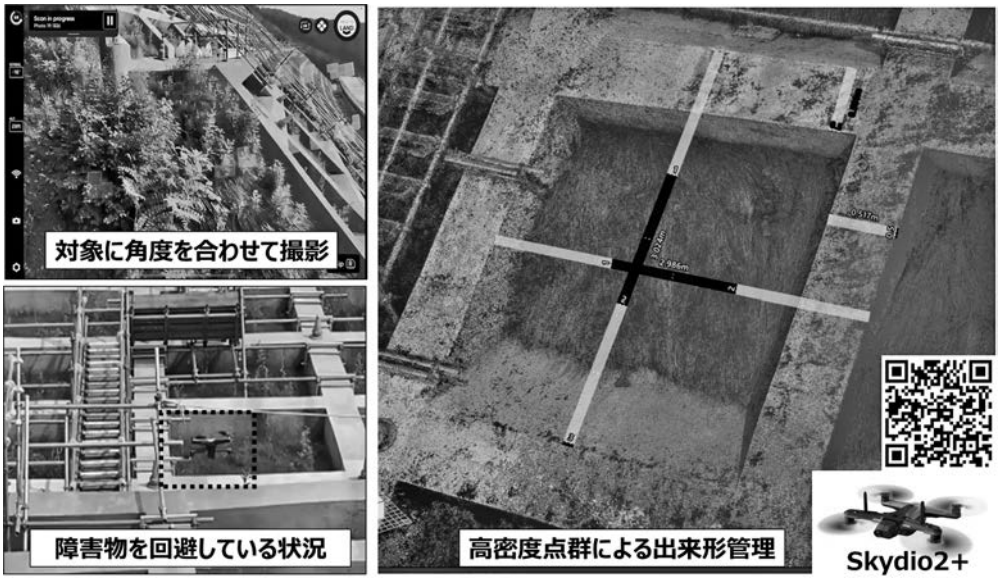
土工事の出来形や数量を UAV で測定する手法は一般的になり，昨今は構造物管理への適用が始まっている。3 次元点群データなどのデジタルツインデータを活用し，施工・管理・検査の効率化が試みられているところである。この中でも，法面保護工は人力での現地計測に多大な労力と時間を費やし，ロープ高所作業の安全管理も大きな課題がある工種である。このため，UAV 測量における撮影方法の工夫などにより，急勾配部での写真解像度の差や，法枠下面やオーバーハング部の点群データの欠損などの問題を解決する方法が提案されている [10), 11)]。一方で，この手法には熟練オペレータの配置が求められる。この課題に対して，Visual SLAM 機能を有する UAV である skydio2+ を使用することで，障害物との接触を回避する自律飛行により法面工の出来形測量を効率化し，誰でもデジタルツイン出来形図を作成できる取り組みを進め，現地

図― 11　Lv.3 UAV による生産性向上の効果

立会の削減と任意時点の監督検査を試みた（**図**― 12）。本取り組みは川上ダムでの試行を経て新丸山ダム本体建設工事で導入を進めており，従来業務を 60％程度削減できる可能性が示された。

6. おわりに

これまで記したように，今までのダム建設技術を研究し，施工のトランスフォーメーションを進める事で建設工事の生産性を高める事が可能となった。この監理の中で，リクワイヤメントを満たした BIM/CIM を活用して施工の合理化・標準化と，デジタルツインに



図―12 自律型 UAV による高密度点群出来形管理

より建設工事監理を行う取り組みが実証された。

また，これらの施工データを維持管理に引き継ぐことで CIM の設計・施工・維持管理での一貫利用も達成され，デジタルツインデータによる維持管理が試みられている。更に，デジタルツインを構築するための UAV 技術においては，自動・自律化による運用がスタートし，遠隔で現場監理する未来は遠くないと実感している。

気象条件が厳しさを増す中，建設現場は熟練技術者の減少と同時に 4 週 8 閉所や労働時間制約も求められている。事業工程と安全・品質を確保するための要求事項・優先事項をしっかりと考え，建設手法と建設監理手法の両面において変革を強く進める必要性を感じる。

本稿の取り組みが, 真の意味での『建設 DX』と『働き方改革』を考えるきっかけとなり，今後の建設事業監理やインフラ管理の参考になれば幸いである。

川上ダム：次世代型ダム建設（YouTube）

インフラメンテナンス大賞

土木学会技術賞（関西支部）

JCMA

《参考文献》

1）日本ダム協会：コンクリートダムの施工
2）ダム技術センター：ダム施工機械設備設計指針（案）2005
3）小俣光弘：川上ダム本体建設工事の施工工法に関する理論的考察，ダム工学，32 巻 1 号 p. 28-39，2022 年
4）第 6 回インフラメンテナンス大賞優秀賞『DX- ダム本体建設における CIM の設計・施工・維持管理への一貫利』
5）国土交通省：インフラ分野の DX アクションプラン（第 2 版） 8 月 2023 年
6）熊本大学，JACIC：CIM を学ぶ
7）小俣光弘：建設現場デジタルツイン監理におけるドローン Lv.3 運行への挑戦，月刊建設機械，6 月号 2024 年
8）内閣府：官民研究開発投資拡大プログラム（Public/Private R&D Investment Strategic Expansion PrograM）
9）第 3 回 中部 DX 大賞奨励賞『高精度デジタルツインを活用した法面工事の出来形管理と普及』
10）藤田 哲：3 次元モデルを活用した法枠工の出来形管理 砂防学会研究発表会，2020
11）藤田 哲：災害復旧法面工事における 3 次元モデルの活用 砂防学会研究発表会，2022

［筆者紹介］
小俣 光弘（おまた みつひろ）
㈱大林組
土木本部生産技術本部 ダム技術部
副部長
川上ダム JV 工事事務所
副所長