

3次元計測技術による 機械設備工事出来形管理の革新

札幌開発建設部 豊平川ダム統合管理事務所 機電課 ○久保 恭伸
網走開発建設部 施設整備課 舟橋 誠

土木工事分野では3次元計測の普及が進む一方、機械設備工事においては依然として鋼製巻尺に代表されるアナログ計測が標準とされており、3次元計測の活用は受注者による内部管理の範囲に留まっている。本研究では、鋼製水門製作工事において広域3次元測定機を導入し、従来手法との比較を通じて、省人化および測定時間短縮に伴う生産性向上効果を定量的に検証した。あわせて現行基準とのギャップを整理し、比較データの蓄積に基づく段階的な適用および標準化に向けたロードマップを提示することで、今後のデータ収集のあり方と制度化への方向性について検討を行った。

キーワード：3次元計測、機械設備工事、出来形管理、生産性向上

1.はじめに

(1)機械設備工事における品質管理の現状と課題

近年の建設・製造業界は、労働人口の減少および熟練技術者の高齢化という構造的な課題に直面している。特に中大型鋼製水門をはじめとする機械設備工事の製作現場においては、品質検査および監督業務の多くが、依然として人手に依存した測定・確認作業によって実施されており、これが生産性向上における大きな制約要因となっている。従来の出来形検査では、鋼製巻尺や下げ振りといったアナログ測定器具(図-1)が標準的に用いられてきた。これらの手法は長年にわたり一定の信頼性を確保してきた一方で、多人数による作業を前提とするため測定時間が長期化しやすく、また測定精度や再現性が作業員の熟練度や周辺環境に左右されやすいという特性をしている。このような背景から、製造業分野では3次元計測技術が急速に普及しつつあるが、機械設備工事においては制度面や基準面の制約により、公的検査において十分に活用されているとは言い難い状況にある。

(2)本研究の位置付けと実測データの概要

本研究では、3次元計測技術(図-2)を用いた出来形管理の実用性を検証するため、既に現場導入が進んでいる機械設備工事において、水門製作会社2社の協力を得て取得したデータを分析対象とした。これらの工事では製作工場において既に3次元計測機器が導入され、従来の出来形検査の補助的に計測が実施されている。具体的には、網走開発建設部管内の河川中小型水門および鋼製付属物工事(A社)と、札幌開発建設部管内のダム用大型水門、河川・農業用水門および鋼製付属物工事(B社)



図-1 従来手法での計測（下げ振り、鋼製巻き尺使用）

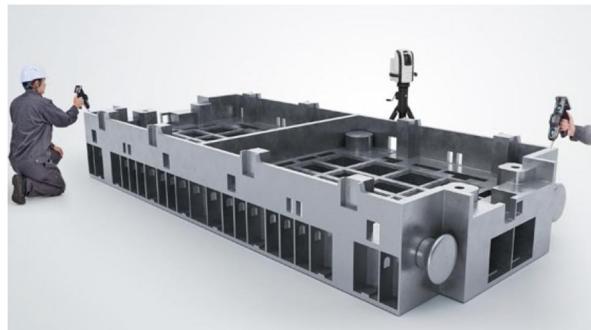


図-2 3次元測定器を用いた計測

(出典：メーカー製品カタログ)

の実証データを基に、測定精度、再現性、および生産性向上効果を多角的に分析した。

(3) 本研究の目的と構成

本研究の目的は、機械設備工事における出来形管理を対象として、3次元計測技術が現行基準に基づく検査をどの程度代替・補完し得るかを定量的に明らかにし、機械設備工事における3次元出来形管理基準の段階的導入に向けたロードマップを提示することである。

2. 現行の出来形管理基準と従来手法の比較

(1) 現行の出来形管理基準における測定手法

3次元計測技術の導入を検討する上で最初の障壁となるのが、現行基準の構造的特性である。国土交通省および農林水産省における機械設備工事の出来形管理基準は、測定対象だけでなく、使用する測定器具および手法が具体的に規定されている。例えば三方水密スライドゲートの扉体寸法検査では、全幅・全高の測定方法として「鋼製巻尺による測定」(表-1)が明示され、戸当り部の真直度については「ピアノ線、レベル、金属製直尺等で2mごとに測定する。」ことが求められている。このように、現行基準は品質要求事項そのものよりも測定プロセスを詳細に規定しているため、優れた新技術であっても単なる代替手段として適用することが困難な制約となっている。

表-1 三方水密スライドゲートの扉体寸法の出来形管理基準
(国土交通省機械工事施工管理基準(案))

項目	管理基準値 (mm)	判定基準
扉体の全幅 (a_L, a_R)	± 5	上下各1箇所を鋼製巻尺で測定する。
扉体の全高 (b)	± 10	左右各1箇所を鋼製巻尺で測定する。

(2) 従来手法の課題

アナログ計測は、巻尺の張力や下げ振りの設置状態、目視による数値読み取りなど、測定者の測定誤差に起因するばらつきを不可避的に含む。このため再現性の確保や客観的比較には一定の限界がある。また大型構造物の検査では高所作業や多人数での共同作業を要し、作業の長期化や安全面でのリスクも内在している。現行基準は点計測に依存しているため、構造物全体の形状や変形状態を網羅的に把握することは困難であり、検査結果が限られたサンプル点に依存せざるを得ない。将来的には点群

データを用いた面的評価へと発展させる余地があるが、本研究ではまず、現行基準が要求する点計測をいかに効率的かつ高精度に代替できるかという点に焦点を当てる。

3. 3次元計測技術による技術的検証と現場効果

(1) 広域3次元測定機の技術的特性

本研究で採用した広域3次元測定機(図-3)は、ワイヤレスプローブを用いて対象物の特定箇所の3次元座標を高精度に取得可能なシステムである。赤外線カメラによりプローブ上のマーカーを追跡することで、広範囲にわたる精密な座標管理を可能とする。本装置は面的・高密度な点群取得機能も有しているが、本研究では現行基準の要求に合わせ、従来の巻尺や下げ振りによる測定をデジタルプローブによる単点測定によっていかに代替できるかという点に主眼を置いた。これにより、従来は複数の器具を使い分けていた検査項目を、一貫したデータ体系として管理することが可能となる。

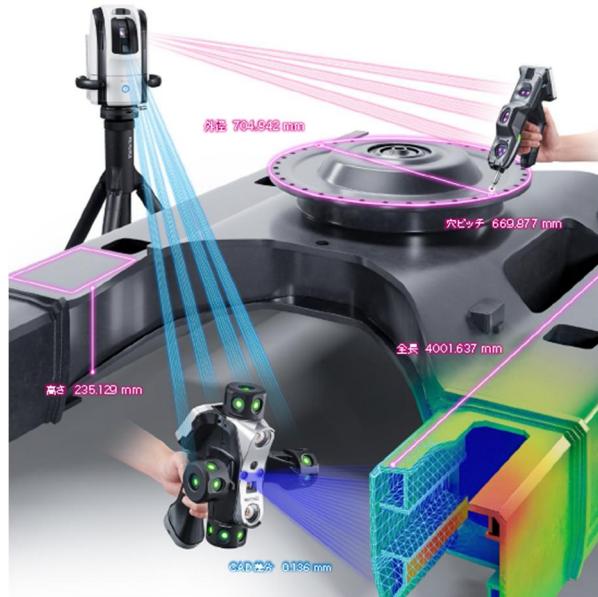


図-3 広域3次元測定機
(出典:メーカー製品カタログ)

(2) 計測スケールおよび難易度別の誤差分布特性

3次元計測技術の出来形管理への適用を検討するにあたり、最も重要なのは従来手法(アナログ計測)との整合性、および計測精度である。そこで、全80点の計測項目を対象として、広域3次元測定機による計測値と従来手法による計測値の差(以下、計測差とする)の分布を分析した。設計寸法(スケール)および計測対象の特性(タイプ1~3)に応じた結果を(図-4)に示す。

a) 計測スケールに対する精度の安定性

(図-4)より、設計寸法が数100mmから17,000mm (17m)に及ぶ広範囲なスケールにおいて、計測差の分散を分析した。なお、設計寸法が0mmとなっているのは真直度および真円度測定である。

特に「タイプ1 (扉体・戸当り・放流管等)」に分類される45点においては、設計寸法の増大に伴う計測差の拡大は見られず、多くのデータが±2.0mm以内の極めて狭い範囲に収束している。これは、長大構造物の計測においても広域3次元測定機が安定した座標取得能力を有していることを統計的に裏付けるものである。

b) 計測難易度別の特性分析

計測対象の構造や手法の難易度別に分類した解析結果を以下に示す。

タイプ1 (計測容易箇所、青色○で示す。) は扉全体幅や放流管管径など、計測面が安定している箇所であり、スケールの大小に関わらず誤差0ライン付近にデータが密集している。これは3次元計測が基準値管理において極めて信頼性の高い代替手段であることを示している。

タイプ2 (中程度の複雑箇所、黄色△で示す。) は操作台やベルトコンベア等の鋼製付属物であり、10mを超える長尺物において数mm程度の乖離が見られる傾向にある。これは従来手法において、長尺計測時の巻尺の自重による「たわみ」や、温度変化に伴う伸縮の影響が顕著に現れた結果と推察される。

一方で広域3次元測定機は空間座標取得であるため、これら物理的原因による誤差を排除できている。

タイプ3 (真直度等、計測困難箇所、赤色◇で示す。) は下げ振りや糸張り、金属製直尺を併用する計測である。タイプ3の真直度計測においては、計測差が±4mmを超える大きな乖離が散見された。下げ振り等は、風圧や振動、目視による読み取り誤差といった「計測の不確かさ」の影響を受けやすい。

図-4の分布は、3次元計測という客観的なデジタルデータが、従来手法に内在する人的・環境的誤差を顕在化させた結果であると解釈できる。

(3) 個別項目における作業時間の短縮効果

図-5は、B社における実証全23項目の計測合計時間と広域3次元測定機導入後の時間を比較し、従来時間の降順で並べ替えたものである。解析の結果、RG扉体や導水管等の大型な構造物ほど作業時間の削減幅が大きいことが確認された。

これは従来手法において必須であった物理的な基準線の設置や計測治具の張り直しといった非生産的な工数が、広域3次元測定機の空間座標一括取得によって根本から排除された結果であり、デジタル計測による工程短縮の優位性が明らかとなった。

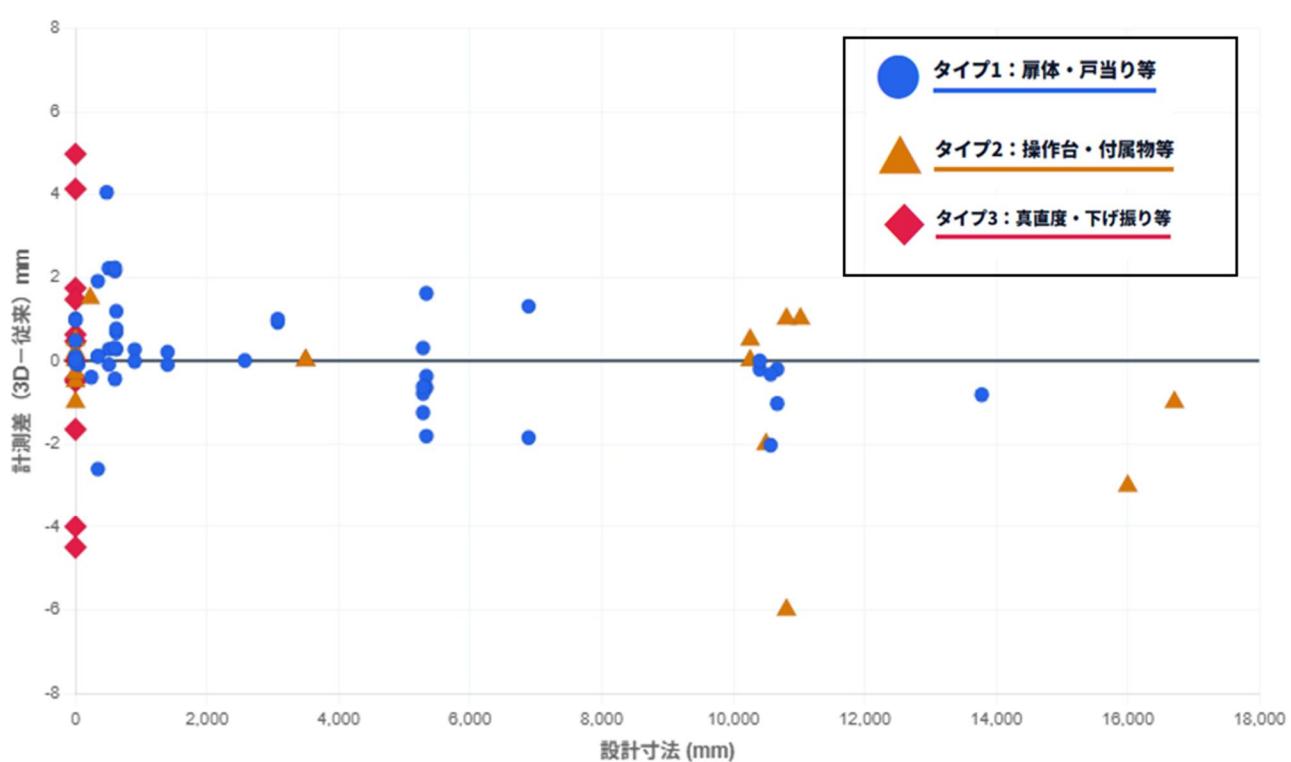


図-4 設計寸法と計測誤差(3次元計測-従来計測)の分布相関

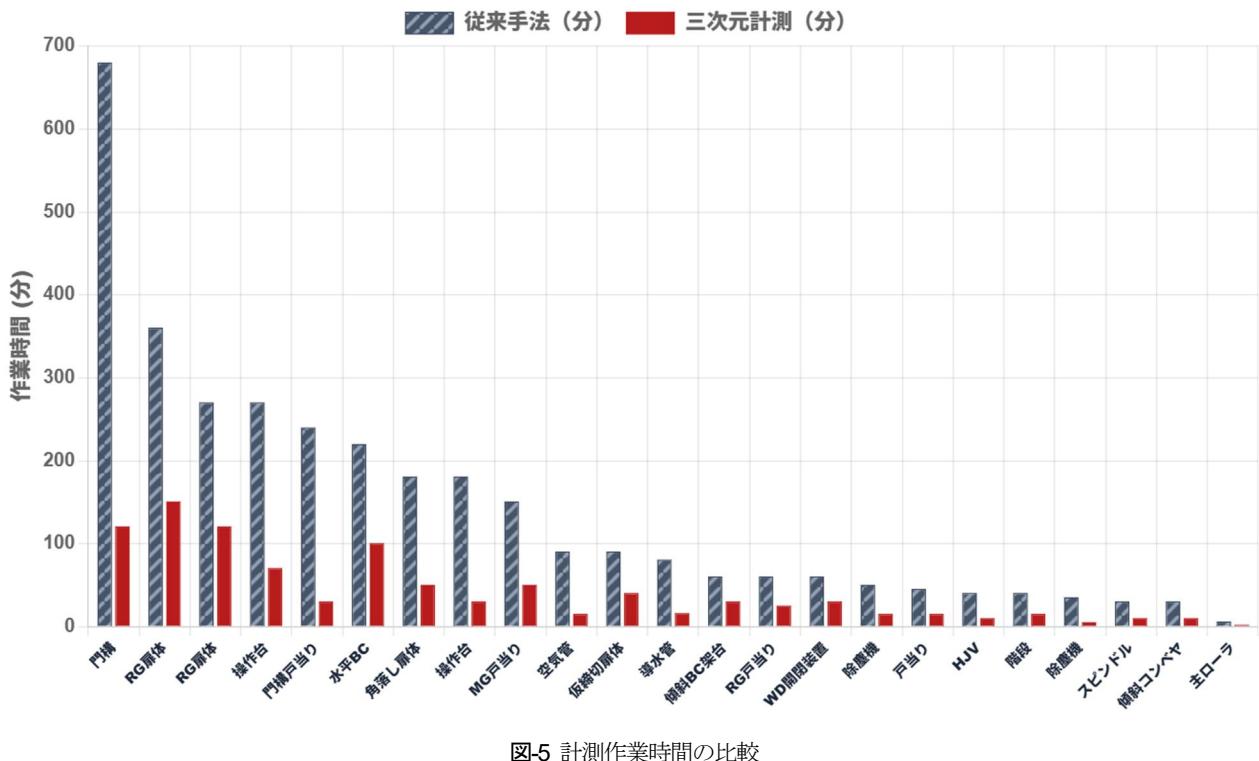


図-5 計測作業時間の比較

(4) 計測体制の省人化と生産性向上の総括

計測業務の全体的な効率化を評価するため、総作業時間、総投入人員、および1項目あたりの平均必要人員の3指標について比較を行った。その総括を(表-2)に示す。実証データの集計の結果、全23項目の合計作業時間は3,266分から957.5分へと短縮され、70.7%の削減を達成した。また投入人員については、従来手法では延べ81名を要していたのに対し、広域3次元測定機導入後は24名へと集約され、70.4%の削減を実現している。1項目あたりの平均必要人員は3.52名から1.04名へと改善され、これはワイヤレスプローブによる単独操作と自動記録機能により、補助員や現場記録員を完全に撤廃できたことを示している。

表-2 計測手法による生産性の比較

比較指標	従来手法	三次元計測	削減率
総作業時間	3266分	957.5分	70.7%
総投入人員 (延べ人数)	81名	24名	70.4%
平均必要人員 (1項目あたり)	3.52名	1.04名	70.5%

(5)品質保証およびトレーサビリティの向上

3次元計測技術の導入は、品質保証プロセスのデジタル化という重要な現象をもたらす。第一に、計測結果が数値データとして直接デジタル記録されるため、測定者の技能に起因する測定誤差が低減され、再現性の高い品質判定が行われるようになる。第二に、取得された3次元データは属性情報を含んだ電子記録として保存されるため、従来の紙媒体や写真中心の記録では困難であった「デジタル・トレーサビリティ」が確保される。第三に、これらのデータはBIM/CIMモデルとの親和性が高く、製作段階の出来形情報を維持管理段階へシームレスに継承することを可能にする。

(6)データ検証考察

本章における一連の実証結果から、広域3次元測定機を用いた計測は、精度面での信頼性を確保しつつ、人員構成と作業時間の双方において、従来手法を凌駕する圧倒的な生産性を有すると結論付けられる。

特に平均人員が1.04名となった事実は、特殊な項目を除き、ほぼ全ての計測工程を一人で完結できることを意味している。これは、現在の建設・製造業界における深刻な労働力不足に対する有効な技術的対応であり、同時に「複数人による読み間違いや転記ミス」といった人的要因を構造的に排除するものである。

さらに、デジタル・トレーサビリティの確保は、検査記録の真正性と客観性を高め、ライフサイクル全体を通じた品質管理の高度化に寄与する。以上のことから、3

次元計測技術の正規採用は、製造現場の省人化と、インフラ構造物に対する高度な品質保証を同時に達成する、次世代の出来形管理基準の核となるものと考えられる。

4. 生産性向上と品質確保を両立する経済的効果分析

(1) 投資対効果 (ROI) の評価

3次元計測技術の導入には、計測機器本体および関連ソフトウェアへの初期投資を要する。しかし、本実証において確認された「70%を超える工数削減」という実績に基づけば、検査業務の抜本的な効率化を通じた高い導入価値を有していると考えられる。特に、従来は複数名で実施していた検査作業が単独作業へと移行した事実は、人件費等の直接的なコスト抑制のみならず、限られた人的資源をより高度な品質管理業務や工程管理へと再配置することを可能にする。

このように、計測プロセスの刷新によって得られる付加価値は、初期投資に見合う十分な便益を創出する可能性がある。

(2) 工期短縮および手戻り防止効果

3次元計測は、測定結果をその場で数値として確認し、図面データと即座に照合できるため、加工誤りや製作誤差の早期把握が可能となる。また、測定手順の標準化により、経験の浅い作業者であっても一定の精度で測定できるため、測定結果のばらつきが抑制される。これは人命要因に起因する見落としを防止し、後工程における手戻り作業の発生を構造的に抑制する効果が期待できる。

(3) 労働環境改善と安全性向上

検査作業の省人化および短時間化は、作業員の高所作業や危険箇所への立ち入り頻度を物理的に低減し、労働災害リスクの抑制に直結する。また、検査員は単純な「測定作業」から解放され、取得したデータの分析や高度な品質評価といった、より付加価値の高い業務に注力することが可能となる。これは、現場技術者の職能を「記録」から「管理・判断」へとシフトさせる一助となるものである。

5. 3次元計測技術導入に向けたロードマップと実装方針

本章では、前章までに得られた実証結果を踏まえ、3次元計測技術を機械設備工事の出来形管理へ導入するための段階的な実装方針を整理する。提示するロードマップは、「信頼性検証」「段階的導入」「基準改定」というプロセスに基づくものであり、既存基準との整合性を確保しつつ、実績を段階的に蓄積することを目的として

いる。このような段階的導入の考え方は、土木工事分野におけるトータルステーション (TS) の導入過程とも整合する。TSについても、導入当初は適用範囲の限定などの制約下で運用が開始され、その後、実績の蓄積を経て現在のような広範な適用へと展開してきた。本研究で想定する導入プロセスも、こうした既往事例を踏まえた、現実的な制度移行を意図するものである。機械設備工事における3次元計測技術の標準化プロセスを(図-6)に示す。



図-6 機械設備工事における3次元計測技術の標準化プロセス

(1) 信頼性検証（新旧併用期間）

最初の段階では、3次元計測の結果が現行の出来形管理基準で要求される精度を恒常に満たしていることを、統計的に確認することを主眼とする。従来手法と3次元計測を並行実施し、両者の差が許容範囲内に収まっていることを十分なデータ量をもって検証する。ここでは、作業者の熟練度や環境条件の違いを含めた複数条件下での結果を収集し、3次元計測が品質および効率の両面で従来手法と同等以上であることを示す。あわせて、測定機器の校正手続きやトレーサビリティの確保、標準的な運用ルールの整理も併行して進める必要がある。

(2) 段階的導入（限定的な実運用期間）

次は、蓄積された信頼性データを踏まえ、リスクの低い工種や条件に限定した形で、3次元計測を暫定的に正規の出来形管理手法として位置付ける。例えば、非水密部の寸法確認や、構造規模が比較的小さい水門を対象とした検査がその候補となる。この段階では、現行基準を「同等以上の精度を有することが確認された3次元計測機器による測定」と柔軟に読み替え、測定結果をデジタルデータで提出・保存する運用を定着させる。これにより、検査者が測定条件や結果を容易に追跡できる仕組みを整備し、基準改定に対する現場の理解を徐々に深めていく。

(3) 基準改定と標準化

最終段階では、これまでに得られた実績と運用結果を踏まえ、出来形管理基準の改訂を目指す。特定の測定器具を指定する規定から、データの精度や信頼性を要求する「性能規定型」の基準へと移行する。この段階においては、3次元計測データをBIM/CIMモデルと連携させることが可能になる。これにより、製作時点の実測形状を基礎とした高度な維持管理や品質保証が達成される。

7.まとめ

3次元計測は、経験の浅い技術者であっても安定したデータ取得が可能であり、作業性や記録性においても多大な利点を有する優れた技術である。これから時代において、このような革新的計測技術を導入することは、建設・製造業界における必然の選択といえる。

本研究における検証により、適切な条件下で3次元計測を運用することで、従来の出来形管理を十分に代替・高度化できる可能性が明らかとなった。今後は本論で示したロードマップに基づき、計画的なデータ収集と実証を継続していくことが重要である。

また、前章でも触れた通り、広域3次元計測機には単点計測のみならず面的計測機能が実装されているものもある。土木工事分野のデジタル化が進ってきた歴史と同様、単点計測がアナログからデジタルに置き換わった次は点から面へと計測手法を進化させることで、更なる品質管理の高度化と生産性向上の余地が残されている。ものづくりの現場で既に標準化されているこれらの先駆的機能を有効に活用し、建設業界全体の技術革新に追随していくことは、今後の機械設備工事における施工体制の維持において不可欠である。

機械設備工事においても3次元計測技術を核とした「出来形管理のデジタル化」が、次世代のスタンダードとして定着することを期待する。

謝辞：本研究の実施にあたり、貴重な実証データの提供と現場検証にご協力いただいた水門製作会社各社、ならびに計測機器のカタログや技術データの提供をいただいた計測機器メーカーに、深く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 有富孝一, 金澤文彦, 田中洋一 (2004) : 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
- 2) 阿部寛之, 上坂克己, 有富孝一, 金澤文彦, 田中洋一 (2006) : 土木工事の検査機器としてのトータルステーションの精度に関する一考察, 土木情報利用技術講演集
- 3) 有富孝一, 阿部寛之, 田中洋一, 金澤文彦 (2011) : TSを活用した道路土工における出来形管理システムの構築と現場実証, 土木情報利用技術論文集
- 4) 黒野寛之, 沼田和久, 石場聰 (2017) : ダム取水放流ゲート設備の維持管理におけるCIMの試行計画について, 北海道開発技術研究発表会論文集