

水中作業の ICT 技術 小型水中バックホウの開発

水中ガイダンスシステムの導入

古川 敦・杉本 幸司・北原 成郎

近年多発している大規模出水の影響により水力発電所の放水口において土砂が堆積し、放水口ゲートを全閉できない状態が発生した。非出水期に短期間で効率よく堆積物を撤去する必要があるため、トンネル状の狭隘な暗渠内において効率の高い機械化施工を実現する必要がある。

このため小型水中バックホウを新規開発し、目視確認が困難な濁水環境下においても安全で効率的な作業を実現するため、i-Construction のマシンガイダンス技術を水中現場に応用し、水中作業用建設機械の傾き等の機械情報や周辺情報を合成して提供する「水中バックホウガイダンスシステム」を搭載した。開発した水中ガイダンスシステムは、陸上試験により性能検証を行った結果、3倍の生産性向上が確認された。本稿では水中ガイダンスシステムの開発の経緯、システム構成、技術的内容、テスト結果、効果等について紹介する。

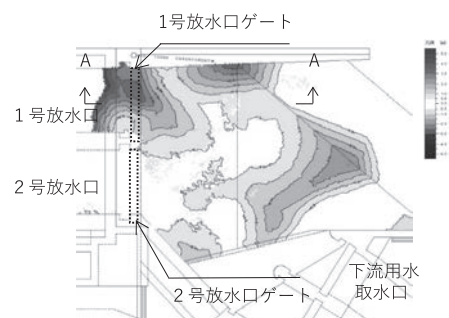
キーワード：ダム、油圧ショベル、水中施工、i-Construction、マシンガイダンス

1. はじめに

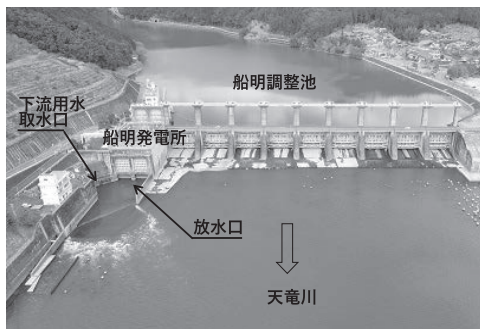
小型水中バックホウを導入した船明ダム（電源開発株）は、1977年に一級河川天竜川の最下流に建設された発電、農業、上水道および工業用水への利水を目的とした重力式コンクリートダムである（写真—1）。2018年には、平成30年7月豪雨だけでなく台風21号、24号通過により、至近5年の中では比較的大規模な出水が連続した。船明ダム右岸直下の船明発電所放水口に土砂および沈木が堆積し、放水口ゲートが全閉出来ない状態となった¹⁾。

放水口ゲートが全閉可能な状態に復帰する為、非出水期に短期間で効率よく堆積物を撤去する必要がある。事前に水中測量した結果、撤去が必要な堆積物量は約600m³と判明した（図—1）。放水口はトンネル

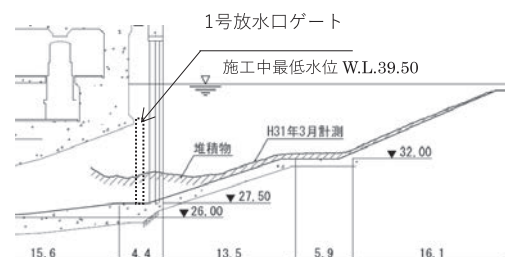
状の暗渠となっており（図—2）、グラブバケット浚渫等の作業船舶の利用ができないため、緊急的にエアリフトによる土砂排除を試みたが、濁りによりほとんど視界が無い状態での作業かつ、一様な砂礫ではなく人頭大の石や沈木が混在していたことから、効果的に排除することは出来ず、期待した撤去量には至らなかった。



図—1 堆積物調査結果 平面（2019年3月測量）



写真—1 船明ダム全景（下流上空より撮影）



図—2 堆積物調査結果 1号放水口断面 A-A断面（2019年3月測量）

このため効率の高い機械化施工が必要と判断し、小型水中バックホウを新規開発した。さらに i-Construction のマシンガイダンス技術を水中現場に応用し、ソナー (SONAR : Sound navigation and ranging) で計測した作業状況を運転席に表示することで、目視確認が困難な濁水環境下においても安全で効率的な作業を実現した。

2. 開発の経緯

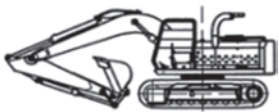

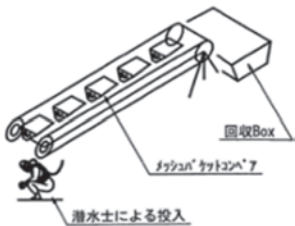
暗渠内における数百 m³ の堆積物撤去の施工方法について、現存する 12t クラスの水中バックホウによる掘削、3t クラスの水中バックホウによる掘削、人力掘削とネットコンベアによる搬出について検討を行った (表-1)。12t バックホウでは締め固まった石を解す能力は見込めるものの、放水口暗渠へ投入する吊り下ろしクレーンの配置が不可能であることが大きな障害であった。人力掘削とネットコンベアによる搬出については、堆積土砂を確実に搬出する方法と想定されるが、透明度が極端に低い水中での回転機械

は、潜水ホースの絡まりなど重大な事故を招く可能性があることが大きな問題であった。ネットコンベアと同様に新規製作の必要はあるが、3t クラスの水中バックホウによる掘削は、12t クラスのバックホウに対し掘削能力は劣るものの搬入用仮設が不要であり、掘削・搬出の工程のみであることから工程的に有利であり、最も有利な施工方法と判断した。上空制限のある現場条件で使用できるクレーンは 25t ラフテレーンクレーン (作業半径 15m で吊り荷重 3t 以下) であったため、定格荷重 3t 以下の水中バックホウを放水口へ投入し、堆積物を暗渠外へ搬出後、穴あきベッセルによる陸上揚収という施工手順を適用することとした。

勾配のある人頭大の玉石等の堆積物上での作業となるため、走行の可否や転石掘り起こしの可否、掘削能力について事前に潜水士による堆積状況の現地調査を行った。その結果、3t クラスの水中バックホウによる施工で堆積物除去および移動先の平面均しが可能と判断した。

使用する小型水中バックホウの設計開発には港湾工事で利用されている既存水中バックホウを参考とし、

表-1 施工方法比較検討

| 工法名称 | 水中バックホウ 12t クラスによる掘削 | 水中バックホウ 3t クラスによる掘削 | 水中ネットコンベア+人力掘削 |
|--------|---|---|--|
| 機械現存形態 | 現存 | 新規製造 | 新規製造 |
| 機械概要 | 機械出力：65 kW  | 機械出力：22 kW  | 機械出力：7.5 kW 程度 (想定)  |
| 施工能力想定 | 1. 締め固まった石を解す能力は見込める。 | 1. 左記 12t クラス、掘削力 6t に対して 3t クラスで掘削力 1t と落ちるが、バケット以外のつかみ装置などの対応も可能。 2. 水中比重で石は約半分の重さ。 | 1. 左記同様、石の大きさ、かみこみ次第では確実に搬出する方法。 |
| 工期の対応 | 1. 直接工事 (掘削) の工程もあるが、搬入に要する工程が肝要。 | 1. 12t クラスのバックホウに対し搬入用仮設が不要のため、掘削・搬出の工程のみ。 | 1. 人力でコンベアに対象物を載せる作業とコンベアの転地が必要。工期があれば可。 |
| 仮設 | 1. +39m 盤までの仮設道路が必要。 2. 潜水士の浮上箇所にはポンツーンが必要。 | 1. 潜水士の浮上箇所にポンツーンが必要。 | 1. 潜水士の浮上箇所にポンツーンが必要。 2. 水中コンクリートにアンカーボルトなど。 |
| 問題点 | 1. 機械重量 12 トンの吊り下ろし箇所がない。 2. +39m までの搬入方法で仮設が必要。 3. 1 : 1.5 のコンクリート盤の降板が困難。 | 1. 傾斜降板の対応が必要。 2. 右記、工法より機械装置が高価。 | 1. 水中で回転物が広範囲にあるため、安全確保の為、潜水ホース巻き込み防止策などが必要。 2. 暗渠内搬送距離が最大想定 16m 程度。 |
| 評価 | × | ○ | × |

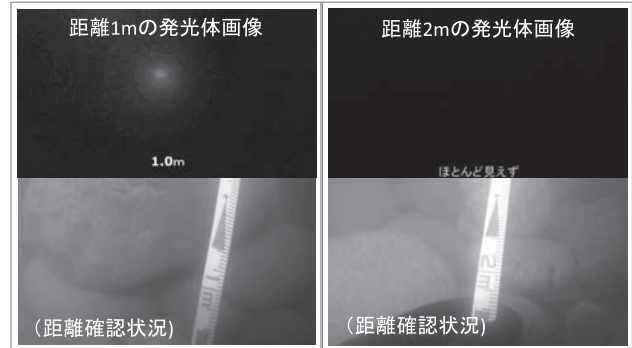
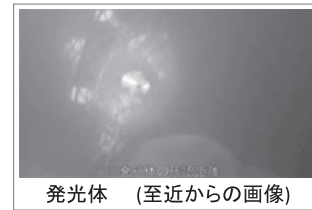
表一2に示す仕様で新規製作した。ベース機体は、2.99tのミニバックホウ、バケット容量0.09m³クラスとし、写真一2の左側のベース機体を右側の水中仕様へ変更を行った。

表一2 小型水中バックホウの主な仕様

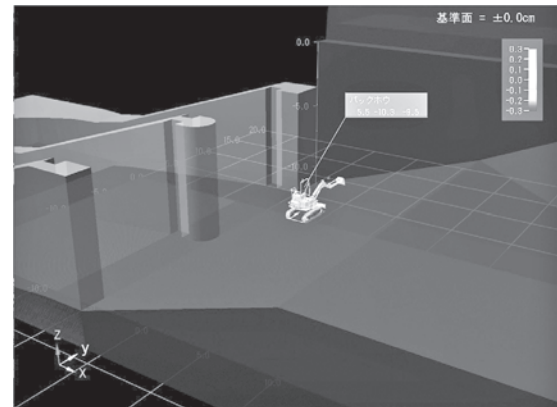
| | |
|--------|--|
| ベース機体 | ミニバックホウ (2.99 t) バケット容量 0.09 m ³ クラス |
| 動力源 | 水中モーター (20 kW) に変更 (陸上から給電) |
| 給電ケーブル | フロートケーブルを採用 (戸当り部との干渉を低減) |
| 油脂類 | 生分解性の作動油等を採用 (万が一の漏油対策) |
| 転倒対策 | 浮上用エアリフトバックを装備 ロールバー状フレームの装備 (暗渠内から排出可能) |



写真一2 小型バックホウ



図一3 発光体による視認性確認



図一4 マシンガイダンス画面

3. 水中マシンガイダンスシステムの開発

暗渠放水口内での視認性を確認するため、放水口内での発光体の視認距離の確認を行った、図一3に示すとおり、発光体であっても距離1mまでが限界であり、バケットの位置、堆積土砂の位置、機体の傾斜状況・壁面との離隔についても認識不可能な環境である。

このように土砂掘削を行う放水口の水の透明度は約30cm程度と極めて低く、運転席から周囲の状況を目視確認することは不可能な環境であり、また作業現場となる放水路は暗渠狭隘部のうへ傾斜していたため、安全性確保のためには図一4のようにコンクリート壁面やアーム角度などの機体姿勢をグラフィカルに表示する「水中マシンガイダンス」技術が有効であると判断した。

「水中マシンガイダンス」技術は内閣府沖繩総合事

務局と国立研究開発法人 港湾空港技術研究所が研究開発をおこなっている「水中遠隔操作支援システム」の成果^{2), 3)}を応用し、本工事における小型水中バックホウへの適応は、港湾空港技術研究所と共同研究を実施している極東建設株が担当した。

水中マシンガイダンスシステムは、図一5に示すとおり、機体の姿勢を検出する傾斜・方位センサ、ブーム・アーム・バケットの角度を検出する角度センサ、掘削地盤面を計測するソナー、壁面との位置関係を計測するソナーの各センサで構成され、陸上と有線接続する耐圧容器を介して、水中でオペレータがガイダンス画面を確認しながら操作するための水中モニターを配置している。

この水中マシンガイダンスは、外界状況を計測するためのソナーが追加され、機体周辺の堆積物の形状や、機体と水路壁面までの距離を表示することが可能となった事が大きな特徴となっている。また水路壁面など構造物の形状を3D表示することで、狭隘部での

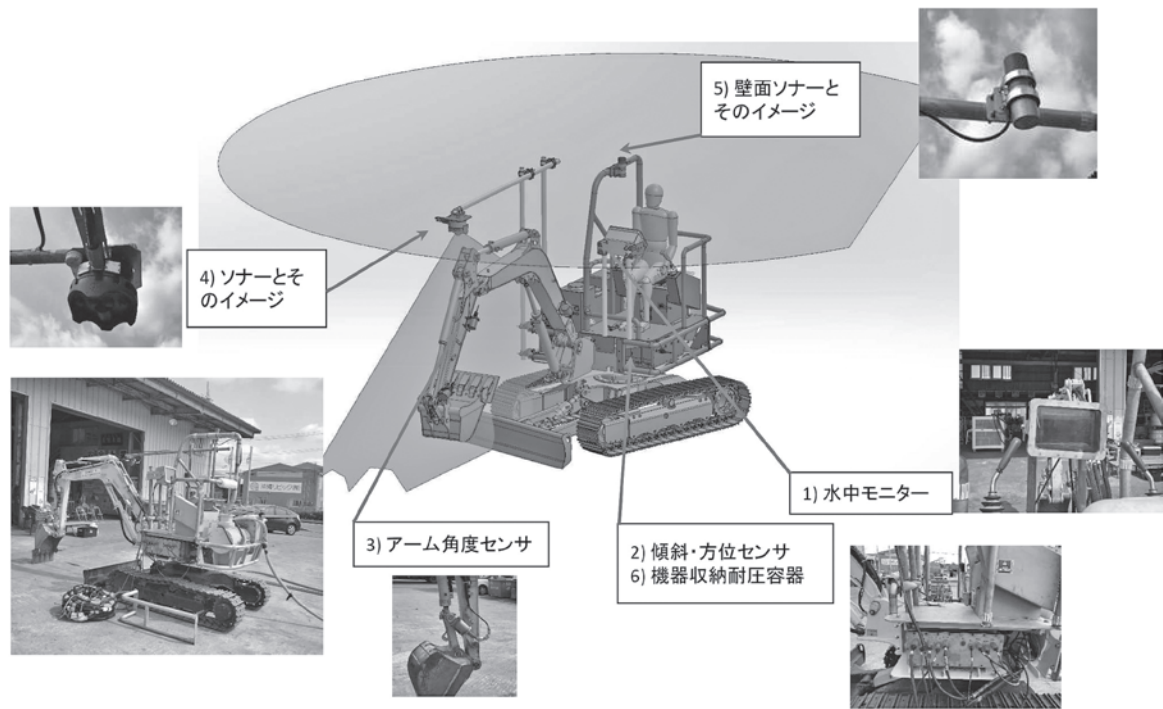


図-5 水中マシンガイダンスシステム

位置関係を直感的に認識することが可能となり、放水路壁面や天井との接触事故を防ぐ事ができる。

通常の誘導による施工では、誘導潜水士の音声指示のみで対象面の状況を認識するが、水中マシンガイダンスではソナー計測による地形を表示しているため、水中透明度約 30 cm 程度といった全く視認ができない状況下においても、マシンガイダンスによって周辺認識率は格段に上がり、安全性の向上や作業の効率化に有効な手段となる。水中透明度が低いこと並びに発電所停止期間が限られていることも踏まえ、施工能力向上に資するためには、この水中マシンガイダンスは必須の装備と考えた。

4. 堆積土砂撤去工事の概要

水中マシンガイダンス機能を装備した小型水中バックホウによる堆積土砂撤去工事の施工配置を図-6に示す。放水口水面に作業支援台船として面積約 40 m²の鋼製ポンツーンを浮かべ、マシンガイダンス支援室・動力発電機・潜水機器のほか、機体収容スペースを配置し、作業支援台船から給電ケーブルにより水中のバックホウへ電力供給する。水中バックホウは暗渠壁面の位置や暗渠底面の状況をソナーで確認し、潜水オペレータの搭乗操作により放水口暗渠内に進入して堆積物を撤去する。撤去した堆積物はバケットに入れたまま小型水中バックホウ後方の開水路側に配置した穴あきベッセルへ運搬・投入した。

穴開きベッセルの位置についても、ソナー計測で認識可能であったため、初回の運搬で位置を認識し、2回目以降はガイダンスシステムにより移動・掘削・運搬を行うことで作業の効率化を図った。

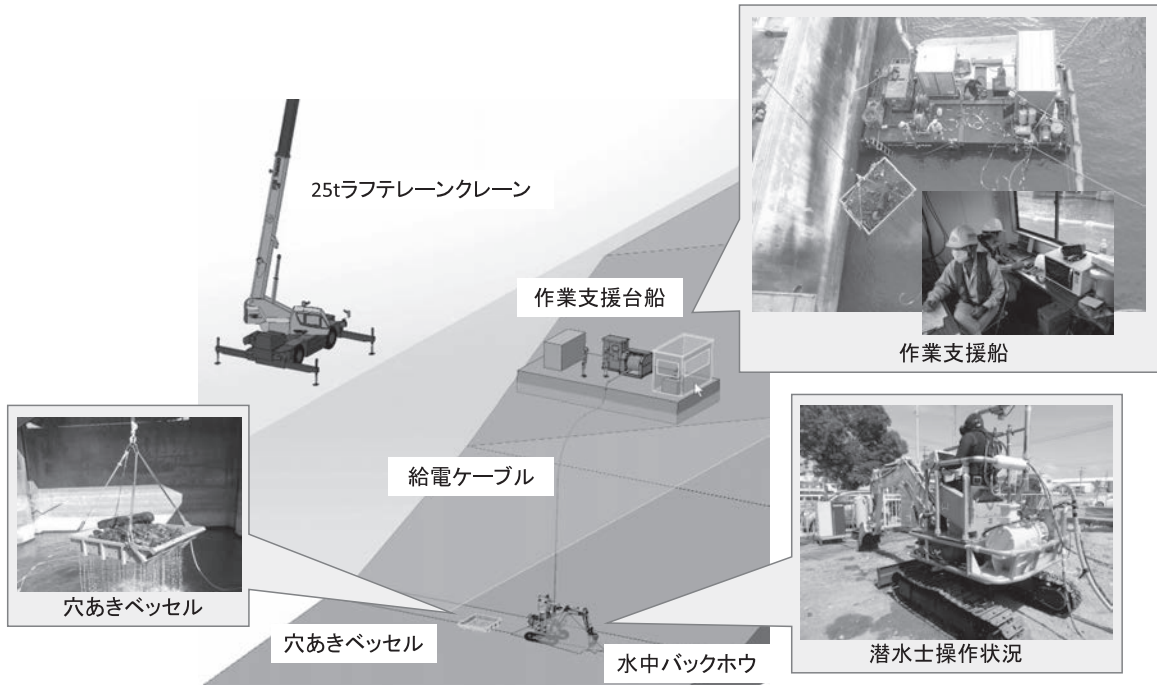
作業中の水中マシンガイダンスは、作業支援台船上の支援室内の PC により操作した。ベッセルに満載となった堆積物は、25 t ラフテレーンクレーンにより放水口水中からダムエプロン部に揚収した。

5. 生産性向上の検証

実施工では最初から水中マシンガイダンスを使用し、の施工であったため、ガイダンスが無い場合の実績値は確認できていない。このため生産性向上の実績値の推定については、陸上テストにより実施する事とした。

ガイダンスなしの場合は視認性のない状況で、潜水オペレータが、バケット、アーム、ブーム、旋回の動作を、誘導潜水士からの水中通話を聞きながら操作する。また誘導潜水士は、常にバケットを触りながら、土砂や壁面等の外界状況を確認しながら、常時音声でオペレータに操作を伝達する必要がある。陸上試験では、誘導潜水士がバケットを触るかわりにポールを接触させて水中作業を模擬した。潜水オペレータについても視認性のない状況を目隠しにより再現した。

図-7にはマシンガイダンスなしの、誘導員による陸上試験のフローを示す。誘導潜水士は足元が見え



図一六 施工配置

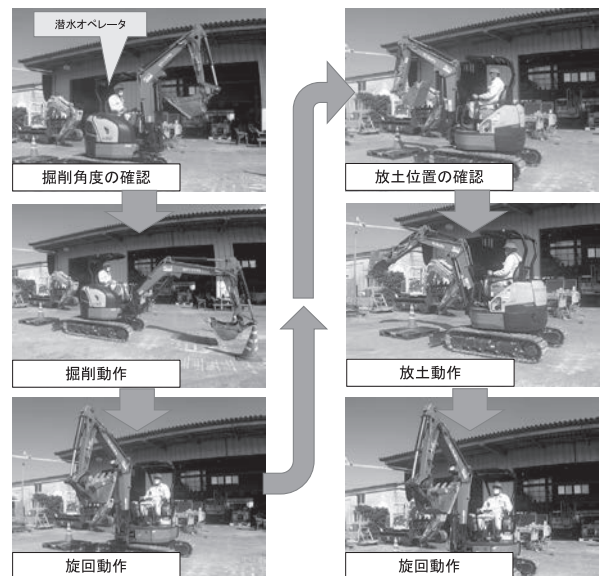
ない中、常に水中を移動するとともに音声での誘導を継続する作業となるため、潜水士の肉体的負担は大きく、ガイダンスなしの場合には土砂掘削から放土までに多大な時間と労力が必要となる。

ガイダンスありの場合（図一八）は誘導潜水士の移動や音声での誘導も少なくなるため、大幅な生産性向上が図れる。またガイダンスがある場合、誘導潜水士は安全な離れた位置に配置する事が可能なため誘導潜水士も含めた作業の安全性も向上する。

陸上テストでは、水中を模擬した潜水士誘導による運転と、マシンガイダンス情報と同等の有視界による



図一七 陸上テスト（ガイダンスなし）



図一八 陸上テスト（ガイダンスあり）

運転により、掘削・旋回・放土・旋回の1サイクルの動作にかかるサイクルタイムを計測し、平均サイクルタイムにより効率比較を行った。図-9のとおり、マシンガイダンスなしでは1サイクル300秒程度を要した作業が、ガイダンスありでは100秒程度に短縮される事が確認された。陸上テストでは約3倍の生産性向上が認められたため、水中の実施工でも同等の効率であると推定される。

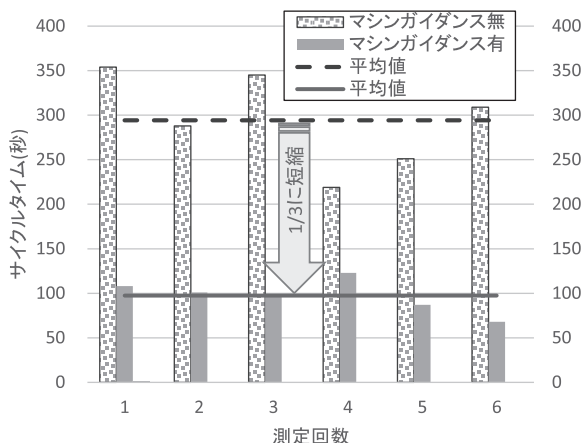


図-9 ガイダンスシステムによる生産性向上

6. おわりに

陸上試験により生産性向上は約3倍の効果が確認され、小型水中バックホウマシンガイダンスシステム分野への適用を目指して精進し、新技術を取り入れな

がら、機器開発や技術提案のすそ野を広げていきたいと考えている。

JICMA

《参考文献》

- 1) 藤崎誠, 松井俊, 秋山裕之: 船明発電所放水口の堆積土砂撤去工事における ICT 活用～水中バックホウへの水中マシンガイダンスの適用～, 電力土木, 2021年No.415, (一社)電力土木技術協会, 2021年9月
- 2) 平林丈嗣, 喜多司, 吉江宗生, 上山淳, 金城寛, 大城尚紀, 金城信之: 水中バックホウの遠隔操作化に向けた取り組み-1～外界計測の高度化, 第19回 建設ロボットシンポジウム, 2019年10月
- 3) 平林丈嗣, 喜多司, 吉江宗生, 上山淳, 鈴木正己, 金城寛, 大城尚紀, 金城信之: 水中建設機械を対象とした作業情報呈示システムの適応検討, 第18回 建設ロボットシンポジウム, 2018年9月

【筆者紹介】



古川 敦 (ふるかわ あつし)
 (株)熊谷組 土木事業本部 ICT推進室
 担当部長



杉本 幸司 (すぎもと こうじ)
 (株)熊谷組 土木事業本部 電力営業部
 部長



北原 成郎 (きたはら しげお)
 (株)熊谷組 土木事業本部 ICT推進室
 室長