

ウルトラファインバブル技術の浚渫泥土処理への適用 -史跡松本城浚渫工法調査業務における実証実験-

Application of Ultra Fine Bubble Technology to Slurry Treatment after Sediment Dredging at the Moat of Matsumoto Castle

松生 隆司*¹ 大山 将*¹ 小笠原 貴道*²
Takashi Matsuike Sho Oyama Takamichi Ogasawara
永塚 典幸*¹ 平尾 壽啓*¹
Noriyuki Nagatsuka Toshihiro Hirao

要旨

史跡松本城浚渫工法調査業務では、松本城の内堀に堆積した堆積物（泥土）除去と水質浄化を図ることを目的に、内堀の所定範囲（おおむね 300m²）における浚渫業務（実証実験）の実施とともに、土壤汚染対策法に定める溶出量基準を超えるヒ素を含む堆積物の適切な処理も併せて求められた。そこで、浚渫には美観を損なわない特長を有する水中排砂ロボットを用いたサブマード工法を採用した。浚渫した泥土は、脱水固化処理過程にオゾン・酸素ウルトラファインバブルを導入し、酸化促進により堆積物に含まれるヒ素の安定化を図ることとした。また、余剰の処理水は溶存酸素量が高い酸素ウルトラファインバブル水として堀に放流することで、堀の水質浄化にも貢献する脱水固化処理システムを構築し、実証実験を実施した。本報告では、実証実験における水中排砂ロボットを用いた堆積物の浚渫の状況とウルトラファインバブル技術を適用した浚渫泥土の脱水固化処理の結果について報告する。

キーワード：ウルトラファインバブル 史跡松本城 堀 浚渫 脱水固化処理 水質浄化

1. はじめに

史跡松本城の堀は、江戸後期から続く長年の堆積物により水深が非常に浅くなり、降水量の少ない時期などは堀の水面上に堆積物が露出し、悪臭を発生する状況となっている。また、堆積物からは自然由来と推測されるヒ素が土壤汚染対策法に定める溶出量基準を超えて検出されており、景観保全のための堆積物の除去と水質浄化が大きな課題となっている。

松本市では、松本城の歴史的な景観および快適な公園環境・見学環境の維持向上を図るため、松本城の内堀、外堀および総堀の全面的な浚渫の実施を予定している。そこで、松本城に適した効果的な浚渫方法を選択するため、浚渫工法調査業務として公募型プロポーザル方式により浚渫業務（実証実験）の実施を含めた技術提案を令和2年8月に募集し、当社を含めた3社の提案を採択した¹⁾。

本報告では、浚渫方法として採用した、美観を損なわない特長を有する水中排砂ロボット²⁾を用いたサブマード工法による浚渫の状況と、浚渫した泥土の脱水固化処理過程にオゾンを含む酸素ウルトラファインバブルを導入し、酸化促進により堆積物に含まれるヒ素の安定化を図った実証実験の結果について報告する。

2. 業務概要

業務名：史跡松本城浚渫工法調査業務委託（その3）

発注者：松本市

業務場所：史跡松本城（松本市丸の内4番1号、図1）

工期：令和2年11月9日～令和3年3月10日

業務内容：

- ①浚渫方法；水中排砂ロボットによるサブマード工法を用いた浚渫
- ②浚渫箇所；内堀のうち304m²（図1、写真1）
- ③浚渫厚；浚渫土厚 1m

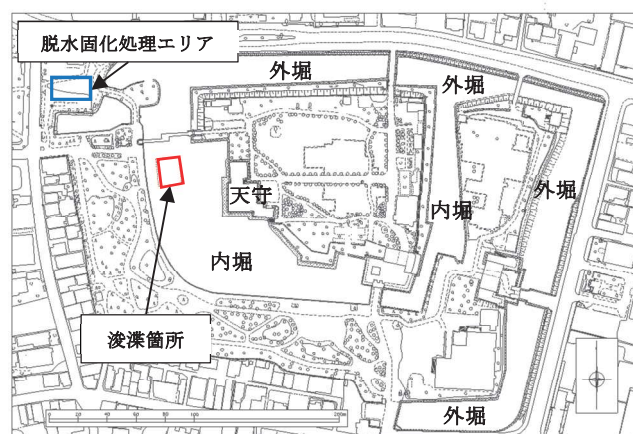


図1 史跡松本城内堀の浚渫箇所

*1 環境エンジニアリング本部 環境技術部

*2 環境エンジニアリング本部 環境ソリューション部



写真1 浚渫前の内堀（浚渫範囲 304m²、16m×19m）

3. 実証実験

3.1 事前調査

実証実験着手前に内堀内の水層、浮泥層、堆積土層の厚み確認の調査を行った。各層の測定は「松本城堀総合調査業務委託報告書」（平成31年3月）を参考に、ボート上からアルミスタッフと検土杖を用い、調査座標点はGNSS測量器を用いて測量した。水層厚は0.06～0.36m、浮泥と堆積土を合わせた層厚は1.28～2.54mであった。図2に浚渫計画範囲の調査断面の一例を示す。

浚渫泥土の脱水固化処理条件を検討するために、浚渫計画範囲中央部の堆積物（浮泥）をエクマンバジ採泥器で試料採取し、土質性状を確認した（図3）。

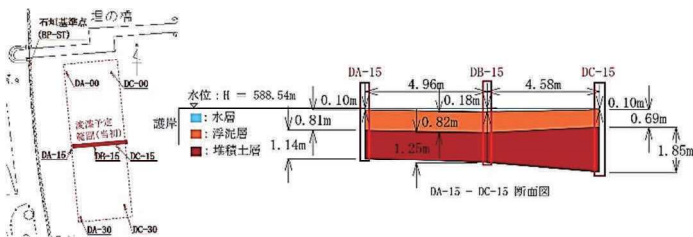


図2 内堀堆積土の調査断面の一例

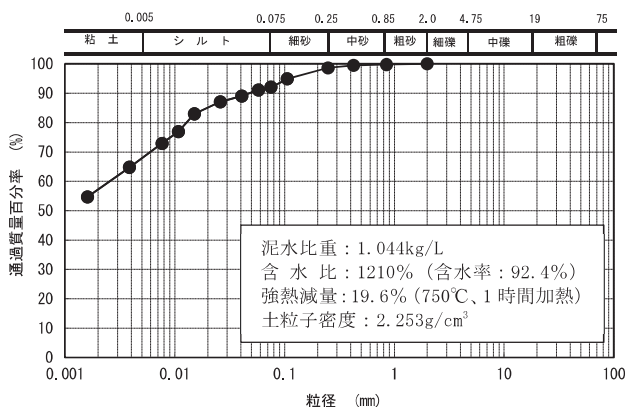


図3 浮泥試料の土質性状

3.2 堆積物の浚渫

堆積物の浚渫は（株）シーテックが保有する水中排砂ロボット²⁾を用いたサブマード工法を適用して実施した。

3.2.1 水中排砂ロボット

水中排砂ロボットはゴムキャタピラーにより掘底を走行し、前部のスクリーで浮泥・堆積土を集めて本体に搭載する排砂ポンプで吸引し、送泥ホースにより脱水固化処理設備に圧送する。本体には水深計、傾斜計、水中カメラ、ソナーなどのセンサーおよび油圧ユニット（キャタピラー走行とスクリー上下動作の油圧制御装置）を装備し、地上操作室で水深、スクリー高さ、回転油圧力、浚渫流量を確認しながら遠隔運転する。浚渫中の水中排砂ロボットや送泥ホースは水面下に沈んだ状態となるため、①水面の美観を損なわない、②浚渫に伴う濁りや悪臭の発生がほとんどない、③機械騒音が抑制される、などの特長を有する。

水中排砂ロボットは火力発電所等の取水、排水設備に堆積した土砂や貝殻などの浚渫で多くの実績があるが、堀の浚渫には初めての適用となる。水路における水中の浚渫イメージを図4に示す。

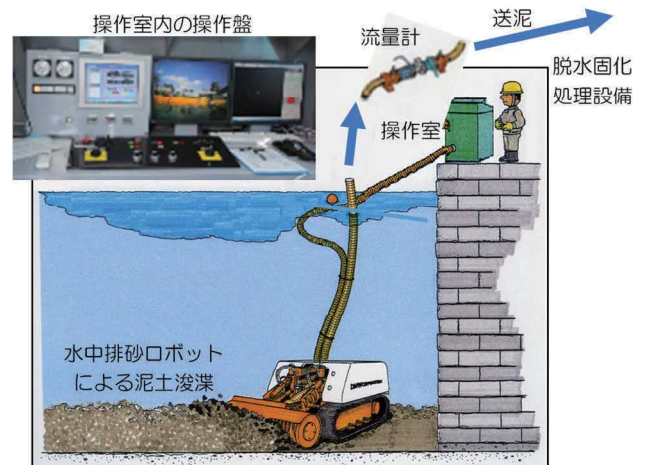


図4 水中での浚渫イメージ（水路での適用例）

史跡である内堀の浚渫にあたり、専用の吊架構造を石垣に面した園路に設置した。吊架構造を用いて内堀に水中排砂ロボットを投入することで、史跡である石垣に対する損傷を防止した。

所定の浚渫範囲の浚渫を行うため、水中排砂ロボットにマストを取付け、水面から突き出たマストの天端に ICT 施工で使われている GNSS 受信機を設置し、ネットワーク型 RTK-GPS 測位³⁾で浚渫中の水中排砂ロボットの正確な位置をリアルタイムで測定した。

吊架構造を用いた水中排砂ロボットの内堀への投入状況を写真2に、水中排砂ロボットへのGNSS受信機の設置状況を写真3に示す。



写真2 水中排砂ロボットと吊込架構



写真3 水中排砂ロボットの位置測量（GNSS測量）

浚渫作業の効率面においても効果を得ることができた。

ピアフロート台船を併用した水中排砂ロボットによる浚渫の実施により、内堀内の 300m² の範囲で、浚渫土厚 1m 以上の浚渫が可能であることを実証した。浚渫範囲の出来形を図 6 に、浚渫完了後の内堀の状況を写真 5 に示す。

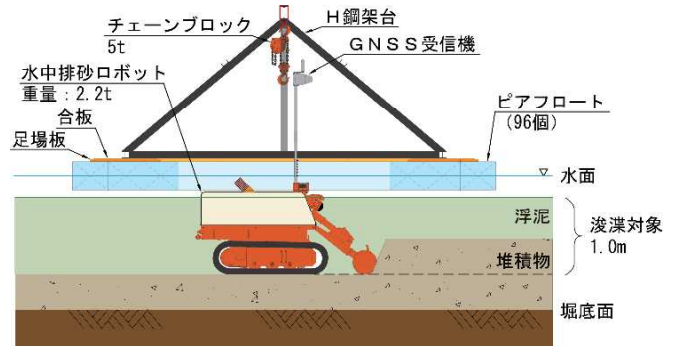


図5 ピアフロート台船を併用した浚渫の概要



写真4 ピアフロート台船を併用した浚渫の状況

3.2.2 浚渫結果

当初計画では、水中排砂ロボットを堀底で自走させて浚渫を行う予定であったが、吊込架構から 2.5m 進んだ辺りで、事前調査で確認できなかった堀底の不陸、大小の石（礫）および黒色土のう袋などの障害物の影響により自走困難に陥った。このため、工期内に浚渫を完了させるため、ピアフロート台船を併用した水中排砂ロボットによる浚渫を実施することとした。

ピアフロート台船を併用した水中排砂ロボットによる浚渫は、高密度ポリエチレン製浮体ユニットであるピアフロート⁴⁾を矩形に組み立てて台船とし、H形鋼による架台を設置し、中央の開口部に水中排砂ロボットを所定深さに吊り下げ、作業船で台船を牽引して浚渫範囲を走行させながら浚渫作業を行うものである。浚渫概要を図 5 に、浚渫状況を写真 4 に示す。

ピアフロート台船を併用することで、水中排砂ロボットの浚渫位置・高さ（深さ）を制御することが比較的容易となり、堀底の不陸や障害物等の影響を受けず、安定した浚渫作業が実現できた。また、水中排砂ロボット自走時には、小石類の噛み込みによりスクリーンの停止が頻発したが、ピアフロート台船併用による浚渫では、石等の吸引はあるものの石の噛み込みによるスクリーンの停止は発生せず、

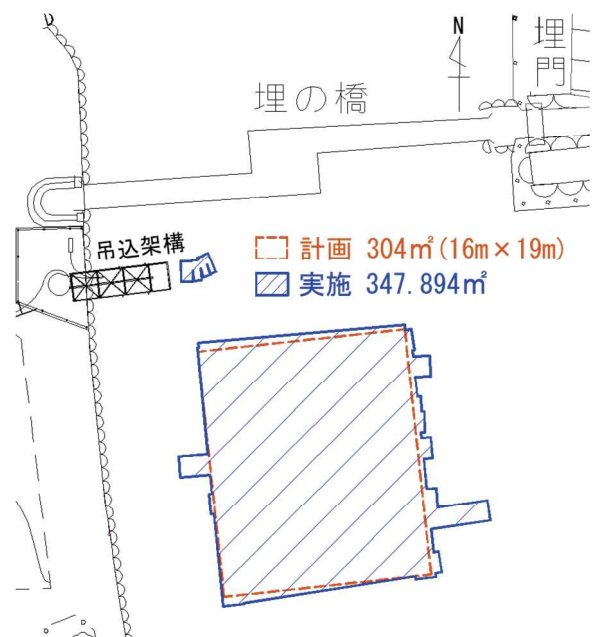


図6 浚渫土厚 1m 以上の浚渫範囲（出来形）

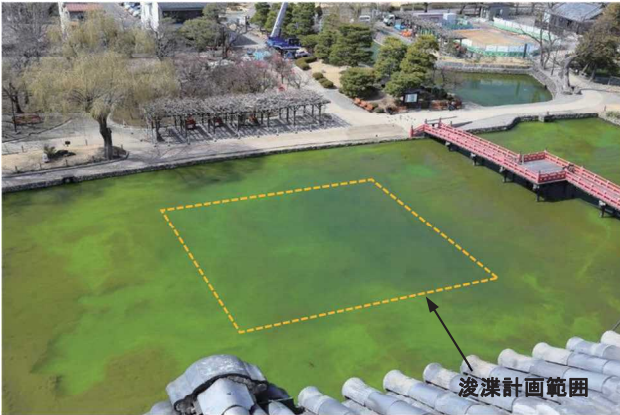


写真5 浚渫完了後の内堀の状況



写真6 脱水固化処理設備

3.3 浚渫泥土の脱水固化処理

堀の堆積物中には土壤汚染対策法に定める溶出量基準(0.01mg/L)を超えるヒ素が含まれている。そのため、脱水処理土(脱水ケーキ)を基準に適合させるための対策として、浚渫した泥土の脱水固化処理過程でオゾンを含む酸素ウルトラファインバブルによる酸化促進と鉄系凝集剤の添加とを併用し、堆積物に含まれるヒ素の安定化を図った。

3.3.1 脱水固化処理の概要

脱水固化処理エリアに設置した脱水固化処理設備の全景を写真6に、処理フローを図7に、設備配置を図8に示す。

水中排砂ロボットによる浚渫で揚泥された浚渫泥土を脱水固化処理エリアまで圧送し、土砂振動フルイで夾雑物(ごみ)を、サイクロンと振動フルイで砂礫分を回収した。シルト・粘土分を含む泥水は原水槽から濁水処理装置に送り、沈降分離槽(シックナー)にて、沈降スラッジと上澄水に分離する。沈降スラッジは最終的にフィルタープレスを用いて脱水固化を行い脱水処理土(脱水ケーキ)として回収

し、余剰の上澄水は処理水として外堀に放流した。

3.3.2 ヒ素対策について

当社では泥水式シールド工法で自然由来のヒ素を含有する地盤を掘削する際の泥水管理手法として、泥水のpHを弱酸性領域としたうえで酸素ウルトラファインバブルによる酸化促進を図りヒ素を安定化させる手法を開発しており⁵⁾、今回、それを応用して浚渫泥土の脱水固化処理過程におけるヒ素対策に適用した(図7)。

ウルトラファインバブル(以下、UFBと称す)は1 μ m未満の気泡の総称である。液中のUFBは気体溶解効果が高く、長時間持続する性質を有しており、酸素、オゾン、二酸化炭素などのガスを使って洗浄や水質浄化など環境分野にも活用されている⁶⁾。

UFB発生装置として(株)ワイビーエム製のフォームジェット⁷⁾(FJP-12)を脱水固化処理設備の原水槽に2台設置した(写真7)。オゾンを含む酸素UFBを連続して発生させることにより浚渫泥土(泥水)の酸化を促進させた。

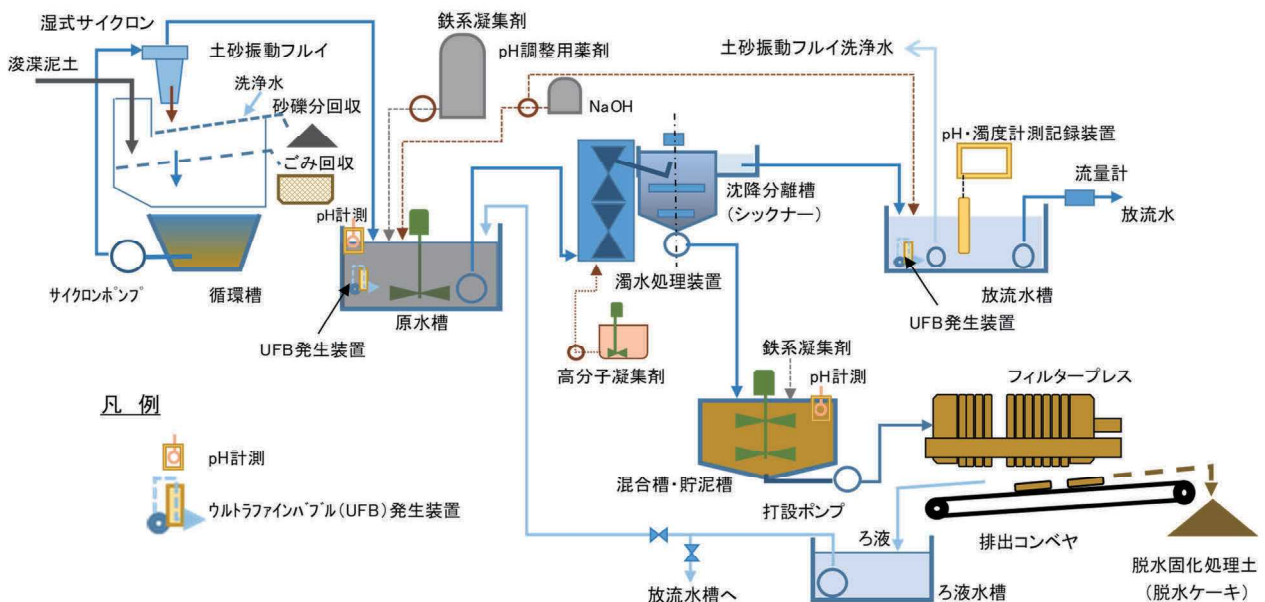


図7 脱水固化処理フロー(ヒ素対策)

また、浚渫泥土（泥水）に鉄系凝集剤（ポリ硫酸第二鉄）を添加することで pH を弱酸性に管理し、泥土に含まれるヒ素の鉄への吸着を促進させ、オゾンを含む酸素 UFB の酸化促進と併せてヒ素の安定化を図った。

放流水槽には小型 UFB 発生装置として（株）ワイビーエム製のフォームジェットTM（FJP-3）を 2 台設置し（写真 8）、酸素を供給して高濃度溶存酸素水（酸素 UFB 水）を生成させた。酸素 UFB 水は土砂振動フルイ出口における洗浄水としてシャワーリングに使用し（写真 9）、酸素 UFB 水のすすぎ効果により、回収されるごみや砂礫（一次処理土）の表面に付着するヒ素を洗い流した。

また、堀に放流する余剰の処理水は、高濃度溶存酸素水として底層の溶存酸素量改善等の水質浄化への寄与を図った。外堀への余剰処理水の放流状況を写真 10 に示す。



写真 7 原水槽内の UFB 発生装置の設置と稼働状況（オゾンを含む酸素 UFB + 鉄系凝集剤添加 + 弱酸性管理）



写真 8 放流水槽内の小型 UFB 発生装置（酸素 UFB）



写真 9 一次処理土への酸素 UFB 水のシャワーリング



写真 10 外堀への余剰処理水の放流（酸素 UFB 水）

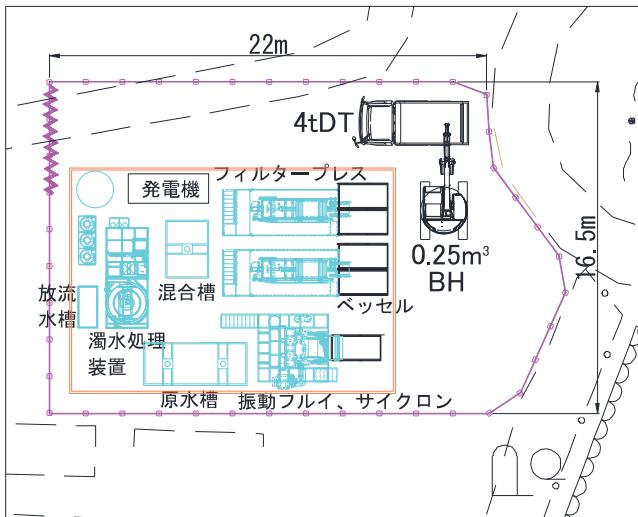


図 8 脱水固化処理エリアの設備配置

3.3.3 脱水固化処理土と処理水の品質管理結果

水中排砂ロボット等による浚渫の総揚泥量 1344.8m³（送泥電磁流量測定）、比重 1.01～1.15（マッドバランス測定）の浚渫泥土を脱水固化処理した結果、一次処理土（砂・礫分）2.9m³、脱水固化処理土（脱水ケーキ）49.2m³を回収し、余剰処理水 1391.61m³を外堀に放流した。なお、処理水 pH・濁度（放流水槽 pH・濁度）は事前に設定した管理値（pH：6～8、濁度：100mg/L 以下）を満足した。

一次処理土（砂・礫分）、脱水固化処理土（脱水ケーキ）のヒ素溶出量については、外部の分析機関で 1 回以上行うことを計画した。実績として、一次処理土および脱水固化処理土の排出状況に応じて、一次処理土では計 6 回、脱水固化処理土では計 11 回の分析を実施し、土壤汚染対策法の指定基準（0.01mg/L 以下）に全て適合した。一次処理土、脱水固化処理土（写真 11）は建設発生土として搬出し、

ヒ素溶出量が基準に適合していることを確認したうえで最終的にリサイクルされた。

- ・一次処理土（砂・礫分）のヒ素溶出量：
0.002～0.006mg/L（計6検体）
- ・脱水固化処理土（脱水ケーキ）のヒ素溶出量：
0.003～0.006 mg/L（計11検体）

分析に供した一次処理土（砂・礫分）の計6検体、脱水固化処理土の計11検体の残りの試料はポリエチレン袋で密封して20℃恒温室内で保管し、1ヶ月後、3か月後および6ヶ月後にあらためてヒ素溶出量を分析した。その結果、全ての試料で基準に適合する結果を得ており、ヒ素安定化の効果が長期的に持続していることを確認した。

外堀に放流した余剰処理水（放流水）は外部の分析機関でヒ素に加えて浮遊物質量（SS）も併せて計7回測定し、以下に示す通り、全て排水基準（ヒ素：0.1mg/L、SS：150mg/L以下（日平均））を満足した。

- ・放流水中のヒ素：<0.001～0.001mg/L（計7検体）
- ・放流水中のSS：<2～22mg/L（計7検体）



写真 11 脱水固化処理土（脱水ケーキ）排出状況

4. まとめ

堀の堆積物の浚渫では、堀底の不陸や障害物等の影響により水中排砂ロボットの自走は困難であったが、改善策として実施したピアフロート台船を併用した水中排砂ロボットによる浚渫は、水中排砂ロボットの浚渫位置・高さ（深さ）を制御することが比較的容易となった。また、堀底

の不陸や障害物等の影響を受けず、安定した浚渫作業が実現でき、実証実験の仕様を満足する浚渫土厚1m以上を確保することができた。

水中排砂ロボットによるサブマード工法は、浚渫に係る主要な機材が水中に潜るため、ピアフロート台船を併用した場合においても比較的コンパクトな設備で、史跡・観光地の景観に配慮しながら堀の環境改善が図れる工法であることを確認した。

浚渫泥土の脱水固化処理では、浮泥・堆積土に含まれるヒ素について、脱水固化処理の過程で鉄系凝集剤を添加してpHを適切に管理するとともに、オゾンを含む酸素UFBによる酸化促進等との相乗効果により、土壌溶出量基準に適合した一次処理土、脱水固化処理土を得ることができた。放流水についてもヒ素の排水基準を十分に満足した。

最後に、浚渫工法調査業務の実施にあたり、発注者である松本市のご指導、および、UFB発生装置で協力いただいた（株）ワイビーエムの皆様に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 松本市：史跡松本城浚渫工事、広報まつもと2021年2月号、pp.8-9、
<https://www.city.matsumoto.nagano.jp/shisei/koho/koho/r3/202102.files/P8-9.pdf>（2021年6月閲覧）
- 2) （株）シーテック：水中排砂ロボット、
<http://www.ctechcorp.co.jp/technology/robot/robot03/>（2021年6月閲覧）
- 3) 国土地理院；GNSSを使用した測量のいろいろ、
<https://www.gsi.go.jp/denshi/denshi45009.html/>（2021年6月閲覧）
- 4) ヨットイングワールド（株）：ピアフロート【組立式浮棧橋】- PIA Float -、
<https://www.yachtingworld.jp/product/pia-float/>（2021年6月閲覧）
- 5) 大山将、松生隆司、小山孝、阪部久敬：自然由来ヒ素含有泥水を弱酸性領域で還流する泥水管理手法に関する実証実験、第25回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集、S2-13、pp.170-175、2019
- 6) ファインバブル学会連合[編]、寺坂宏一、氷室昭三、安東慶太、秦隆志：ファインバブル入門、日本工業新聞社、2016
- 7) 宇川岳史：ファインバブル技術を利用した酸素供給装置、環境浄化技術、vol.14、No.4、pp.38-42、日本工業出版、2015