

ダム堆砂分別吸引アタッチメントの開発

佐野 和幸・新井 博之

ダムにおける堆砂処理は、貯水容量の長期に亘る確保、ダムの長寿命化を図るための重要な課題である。これまで（国研）土木研究所との「吸引工法によるダムからの土砂供給（排砂）技術に関する共同研究（2016年～2020年）」に参画し、土木研究所がダムの上下流に生じる水位差による自然エネルギーを活用した土砂管理技術として研究する潜行吸引式排砂管（以下排砂管）を用いた土砂供給技術の実用化に向けた検討を行ってきた¹⁾。本稿は共同研究の中で開発したダム堆砂分別吸引アタッチメント「T-A Dredger」の開発に至るまでの経緯を紹介する。

キーワード：堆砂、長寿命化、潜行吸引式排砂管、水中施工技術、シャフト式水中作業機、ポンプ浚渫

1. はじめに

（国研）土木研究所との共同研究の概要を図-1に示す。排砂管の実用化に向け、自然堆砂中の沈木・巨石・塵芥等の異物を取り除き、吸引排砂可能な粒径に分別した土砂のみを集積して一時ストックする前処理技術の開発が必要となった。これらの前処理作業を効率的に行うための簡単・コンパクトなダム堆砂分別吸引アタッチメントの開発に至るまでの経緯を紹介する。

2. 開発経緯と要件

(1) 開発経緯

貯水池内の自然堆砂中に存在する沈木・巨礫・塵芥等の吸引困難な異物は、シャフト式水中作業機 T-iROBO UW（以下、本作業機という）等の活用による水中施工技術によって前処理作業が可能と考えた。本作業機は汎用型バックホウがベースとなっているため、用途に応じて水中作業機のアタッチメントを交換することで様々な作業に適用できる利点がある。本作業機の概要を図-2に、各種アタッチメントによる

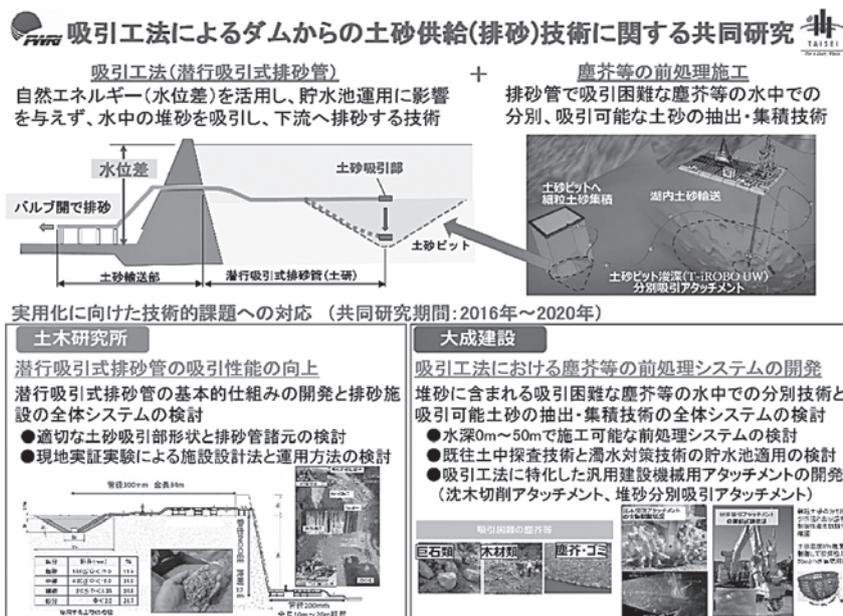


図-1 土木研究所との共同研究概要



図-2 T-iROBO UW の概要



図-3 各種アタッチメントによる作業イメージ

ダム堆砂内異物処理作業のイメージを図-3に示す。このように堆砂中の比較的大規模な異物は、アタッチメントを使用して分別作業を行うことで除去可能となるが、排砂管の実用化には吸引排砂可能な土砂粒径にさらに分別する必要がある。このため、水中の自然堆砂を直接分別吸引して湖内輸送できるポンプ浚渫タイプのアタッチメントを新たに開発することとした。

(2) 開発要件と手順

新たなアタッチメントの開発では、土砂粒径を分別できるスクリーン機構を有した上で、本作業機で適用可能な水深50mからでも浚渫揚砂可能なポンプ性能を有しかつ水中作業機に搭載可能な重量(2.5t以内)に収めることが開発要件であった。開発にあたっては、まず小型サイズのプロトタイプモデルで設計と試作を行い、現場実験等により仕様・構造・性能を確認するとともに機械仕様や構造面での課題を抽出した。そして実装モデルでの改良設計と改良アタッチメントの製作及び性能試験を行い、課題の改善状況と実用ベースの作業能力を確認し、実ダムにおける実証試験で検証する開発手順とした。

3. プロトタイプモデルによる検討

(1) 構造検討・試作

プロトタイプモデルでは、堆砂をほぐしながら吸引できるスクリーンヘッドによって最大径を100mmに選別できる条件とし、アタッチメントに搭載するポン

プは汎用リース品である口径150mm(6インチ)、出力26kW、吐出量2.0m³/分のボルテックス型水中サンドポンプを選定した。アタッチメントの目標能力は吸引土砂濃度10%、浚渫能力30m³/hとした。プロトタイプモデルの構造を図-4、機械仕様を表-1に示す。アタッチメントの吸引部先端のスクリーンは回転式とし、スクリーンメッシュで礫と木材等の長尺物を選別できるものとした。またスクリーンドラム表面に取り付けたツインヘッド型沈木切削アタッチメントに使用したビットを回転カッターとし、吸引中に沈木等に当たっても切削により土砂吸引に支障がないようにした。

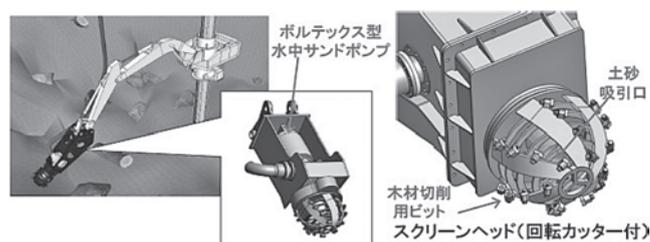


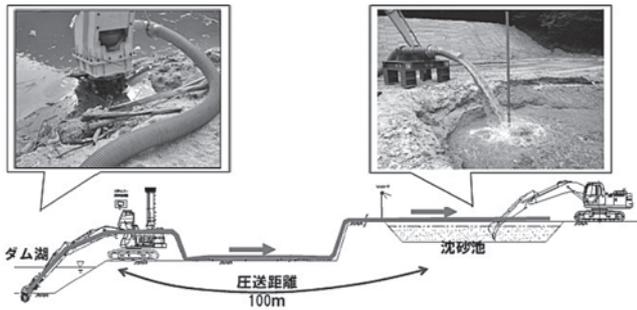
図-4 プロトタイプモデルの構造

表-1 プロトタイプモデルの機械仕様

ポンプ出力	26 kW
電圧	220 V
周波数	60 Hz
吸引・吐出口径	150 mm (6 インチ)
最大揚物径	100 mm (スクリーン対角)
揚程	17 m
流量	2 m ³ /min (最大 3.7 m ³ /min)
定格回転数	10 ~ 60 rpm (可変)
定格出力トルク	2,620 Nm
重量	約 1,600 kg

(2) 現場実験の概要

試作したプロトタイプモデルにおけるスクリーンの有効性及び連続運転による土砂濃度(体積濃度)を確認するため、長野県片桐ダム貯水池内の堆積土砂をポンプ吸引して上流沈砂池まで輸送(輸送距離100m, 実揚程2m)する現場実験を行った(図-5)。なおこの実験では、水中作業機の代用機として、水深3m程度までの水際作業可能な水陸両用バックホウを使用した(図-6)。また土木研究所が水理実験で用いている流量・土砂濃度計測装置²⁾を使用し、リアルタイムに管内の流量と圧力、土砂濃度の計測監視を行った。



図一五 プロトタイプモデル現場実験概要



図一六 水陸両用バックホウ

(3) プロトタイプモデルの現場実験結果と課題

浚渫前の貯水池水際の堆砂粒度は、表層部では粒径 5 mm 以下の砂分が 80% 以上で比較的細かい材料であったが、深部や表層が洗われた部分では 20 mm 以上の粗礫材が 40% 程度あり、最大粒径も 150 mm 程度であった。一方、沈砂池に揚砂した土砂の粒度は、ポンプ先端のスクリーンにより概ね 75 mm 以下であった。礫と木材を除去しながら高濃度の土砂を分別吸引できることを確認し、スクリーンの有効性を確認した。また実験では配管閉塞をしないよう流速が管理流速 3.0 m/s (限界沈殿流速 $V=2.63$ m/s) を下回った場合、清水を吸って流速を維持させるようアーム操作をオペレータが実施していたため、土砂濃度が安定しない時間が多かったものの、良好な連続運転時では土砂濃度 10% 程度、浚渫能力 25 m³/h 程度 (プロトタイプモデル目標性能の 80%) を確認できた。

しかし、揚砂時の土砂濃度急増による流速低下による配管閉塞や粗礫 (75 mm 程度) の噛み込みによる配管閉塞が数回発生し、①吸引粒径と配管径のバランス、②流速低下に対するポンプ能力、③揚砂時の土砂濃度管理が課題として抽出された。

4. 改良アタッチメントの検討

(1) 改良検討

プロトタイプモデルの現場実験における課題を踏ま

えて改良点を検討し、実装モデルでは以下の 4 項目について機械仕様の変更および構造改良を行った。

a) スクリーン開口幅とポンプ口径の見直し (粗礫噛み込み閉塞の防止)

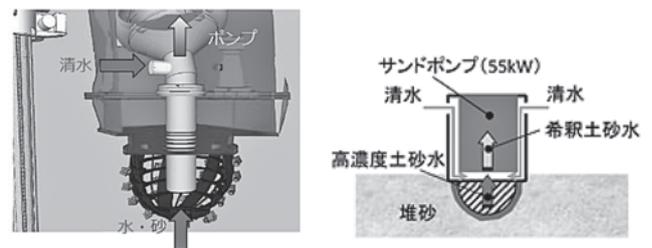
ポンプおよび配管口径 150 mm (6 インチ) に対してスクリーン開口幅が 100 mm としていたことが、粗礫の噛み込みによる閉塞の原因と考えられたため、ポンプ口径を 200 mm (8 インチ) に拡大し、スクリーン開口幅は 60 mm に縮小変更した。

b) ポンプ能力の増強 (砂分沈殿閉塞の防止)

揚砂時の土砂濃度増加に伴う配管抵抗増によって管内流速が低下し、限界沈殿流速を下回ると配管閉塞を起こす。このためポンプ出力を増強して流速低下要因を減らすこととし、口径 200 mm, 出力 55 kW, 吐出量 6.0 m³/分の中撹乱型サンドポンプ (変更前: 出力 26 kW, 吐出量 2.0 m³/分) に機械仕様を変更した。

c) 清水供給機構の追加 (土砂濃度の抑制)

実験では土砂濃度の急増による配管閉塞を完全に排除できない問題があった。これを解決するため、揚砂時の配管が閉塞しないよう常に清水を一定量供給できる構造として、二重管式吸引管を考案した (図一七)。これにより、上部から取り込んだ清水を外管と内管の間から吸引先吸引バランスを調整する機能として、高濃度土砂水の吸引口となる先端開口度を可変できる構造にした。



図一七 二重管による清水吸引機構

d) 回転式スクリーンへの切削チップ設置 (土砂濃度の制御)

実験ではオペレータから水中の土砂吸引状況が見えないことから、高濃度土砂水の吸引過多による配管閉塞が危惧されたため、オペレータが流量と土砂濃度を確認しながらアームを上下させて土砂吸引量を抑えていた。このため土砂濃度の安定、浚渫効率の低下防止に課題があった。これを解決するため、回転式スクリーンドラムに取り付けていた沈木切削ビットをすくい角のある切削チップに変更 (図一八) し、堆砂を切削・切崩しながらスクリーンドラムの

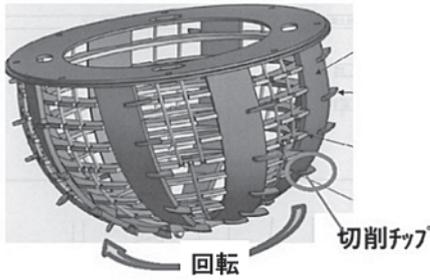


図-8 回転式スクリーンドラムと切削チップ

回転数によって、土砂掻き込み量を調整して吸引土砂の供給量を制御できる構造とした。土砂濃度の抑制・制御機構による土砂濃度管理のイメージを図-9に示す。

(2) 性能確認実験の概要

アタッチメント製作工場内の試験水槽を使用し、改良アタッチメントで水槽内の土砂を吸引、土砂スラリーを配管輸送（配管延長 150 m）後に水槽へ戻して循環させる方法によって性能確認実験を行い、土砂濃度の制御状況と土砂吸引能力の確認を行った。改良アタッチメントの機械仕様を表-2、性能確認実験平面図を図-10に示す。

(3) 改良アタッチメント性能確認実験結果

先端開口度を3水準（46,62,80%）、スクリーン回転数を3水準（20,40,60 rpm）とし、清水と土砂スラリーにおけるポンプ流量と圧力、土砂濃度を計測した。実験結果を表-3に示す。なお先端の開口度は調整管を使用して行った。調整管イメージを図-11に示す。

先端開口度を絞れば、吸引流速が上がり土砂濃度が増加すると想定していたが、結果は同一回転数で比較すると開口度を絞ることで逆に土砂濃度が低下し、流量は増加している。これは開口度を絞ることで、二重管による清水供給量を増加させる効果の方が大きくなり、土砂濃度を低下させたと考えられた。一方、スクリーン回転数を上げれば、土砂の掻き込み量が増加して土砂濃度が比例的に上昇すると想定していたが、40 rpm 以上では遠心力で掻き込み量が減少し、濃度が逆に小さくなる傾向となった。

次に流量・土砂濃度の経時変化について、先端開口度80%・ケーシング回転数20 rpm 時のポンプ圧力と流量・土砂濃度の履歴図を図-12に示す。土砂濃度は10%程度で安定していることを示しており、土砂濃度抑制機構の効果が表れた結果となった。

また今回導入した清水吸引機構の効果を検証するため、清水取込口を鉄板で塞いで土砂濃度の経時変化を

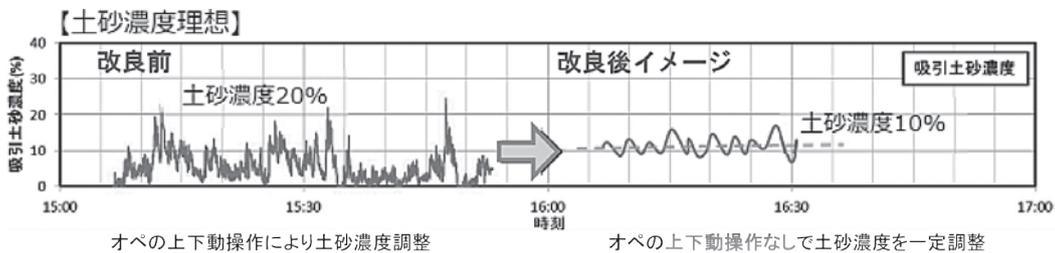


図-9 改良後の土砂濃度管理のイメージ

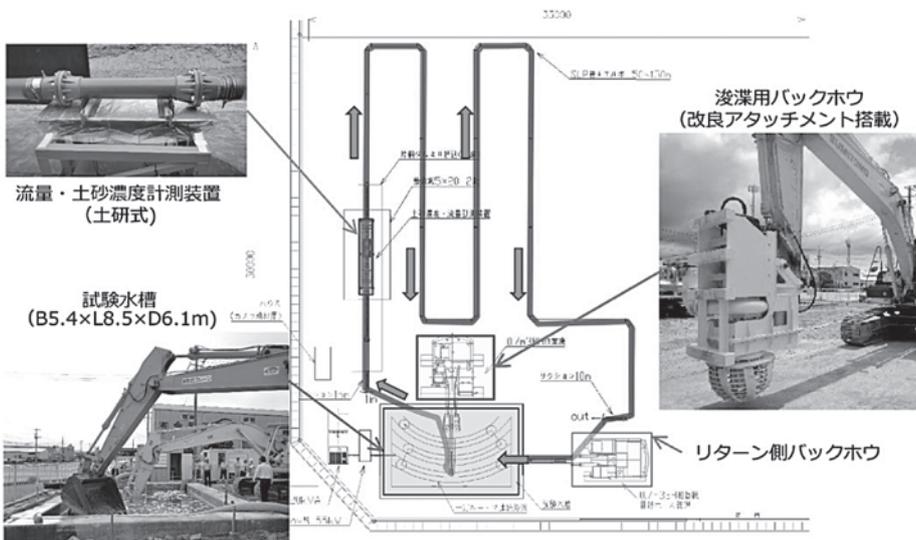


図-10 改良アタッチメントの性能確認実験平面図

表-2 改良アタッチメントの機械仕様

ベース機	汎用型バックホウ (0.8m ³ 級)
搭載ポンプ出力	55kW
吐出口径	200mm (8インチ)
最大揚物径	60mm
揚水流量	7.0m ³ /min以上
スクリーンドラム径	φ890mm
スクリーン回転数	0~60rpm
切削チップ数	24歯
総重量	2,500kg

表一 3 改良アタッチメントの性能確認実験結果

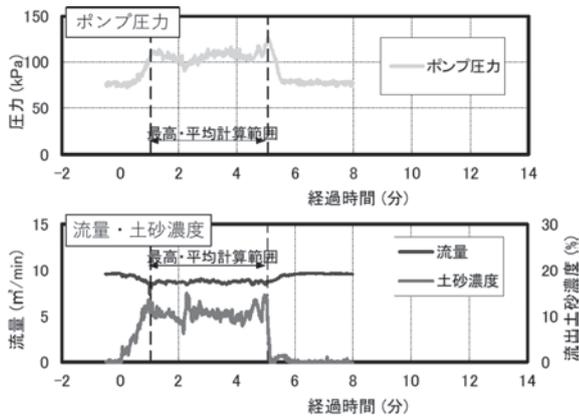
先端開口度 (%)		42% (6B 相当)			62% (7B 相当)			80% (8B 相当)			
回転数 (rpm)		20	40	60	20	40	60	20	40	60	
流体	清水	流量 (m ³ /min)	9.55	9.59	9.53	9.44	9.44	9.48	9.57	9.54	9.57
		圧力 (MPa)	0.078	0.078	0.080	0.077	0.076	0.075	0.077	0.077	0.079
		負荷電流 (A)	101	102	103	100	98	99	97	97	103
	土砂スラリー	流量 (m ³ /min)	9.13	8.92	8.69	8.38	8.27	8.55	8.71	8.59	8.39
		土砂濃度 (%)	6.8	7.6	9.0	10.3	10.7	8.5	10.7	11.4	11.0
		浚渫量 (m ³ /h)	62.4	67.8	78.0	86.4	88.8	72.6	93.0	98.4	92.4
	圧力 (MPa)	0.096	0.096	0.101	0.111	0.112	0.106	0.107	0.110	0.111	
	負荷電流 (A)	120	131	136	126	137	133	131	141	142	

※1 外形管は9B(先端開口度100%) ※2 流量・土砂濃度値は連続運転時の平均値
 ※2 ポンプ定格電流値は102A、表黄色枠はオーバーロード

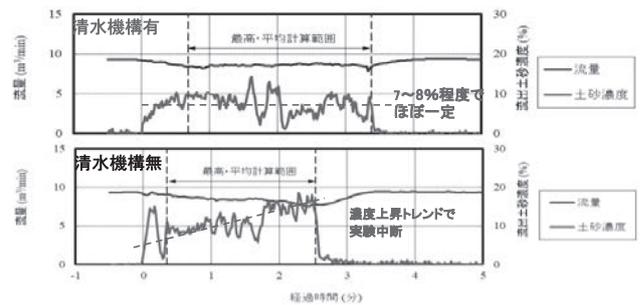


配管先端の開口部を変えて調整

図一 11 調整管イメージ図



図一 12 各計測値の履歴図(開口度80%, 20rpm)



図一 13 清水吸引機構有無による土砂濃度比較(開口度80%, 20rpm)

比較した。流量・土砂濃度履歴結果を図一 13 に示す。清水吸引機構の無い場合、濃度が徐々に高くなり 20% 程度に達して配管閉塞する恐れがあったため、実験を途中で中断打ち切りにした。一方で清水吸引機構がある場合は多少の上下はあるものの 7~8% 程度でほぼ一定となっており、清水吸引機構の効果が示された。

5. 堆砂分別吸引アタッチメントの現場実証試験

(1) 実証試験概要

ダム堆砂処理に特化して開発した堆砂分別吸引アタッチメントの実用性を確認するため、天竜川水系美和ダム貯水池内の堆砂土砂をポンプ吸引し、湖内輸送 500 m を圧送する現場実証試験を行った。実証試験の

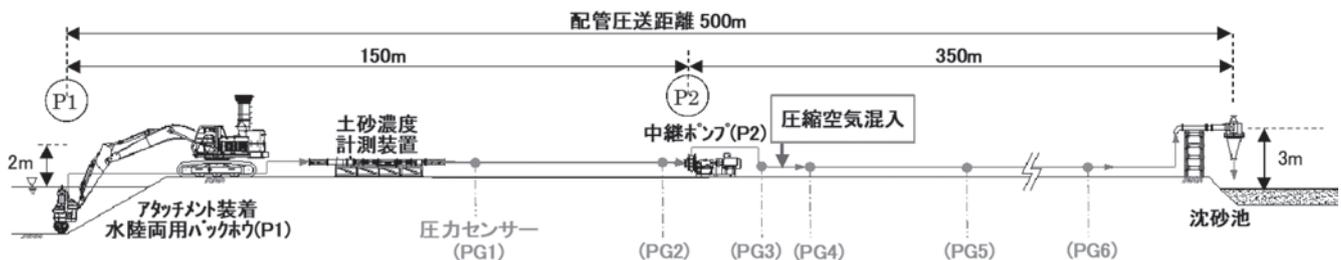
概要を図一 14 に示す。

試験では、本機 (P1) を装着した 0.8 m³ 級水陸両用バックホウを使用して水際の堆砂吸引を行った。また長距離圧送に対応するため、ブースターとして出力 140 kW の中継ポンプ (P2) を直結配管して使用した。なお P2 が過吸引すると P1 のオーバーロードが発生するため、P2 前後の圧力を管理して P2 吐出量をインバーター制御により調整した。また P2 直下流で圧縮空気を混入し、圧送性への影響も確認した。試験計測項目は、土研式の流量・土砂濃度計測装置を使用したリアルタイムの管内流量と圧力、土砂濃度とし、あわせて圧送ライン上の 6ヶ所に設置した圧力センサーによる管内圧力とした。

(2) 実証試験結果

a) ドラム回転数による土砂濃度の確認

美和ダム堆積土砂(固結シルト質)におけるドラム



図一 14 現場実証試験概要図

回転数と土砂濃度の関係を表一4に示す。この結果から、平均土砂濃度が10%程度となるようにドラム回転数を50rpmに設定して試験を行うことにした。

表一4 ドラム回転数と土砂濃度の関係

ドラム回転数 (rpm)	10	20	40	50
平均流量 (m ³ /min)	7.8	7.8	7.4	7.1
土砂濃度最高 (%)	2.5	2.8	9.8	17.4
土砂濃度平均 (%)	0.9	1.3	2.5	10.6

b) 連続運転での浚渫能力の確認

圧縮空気を混入しないケースで5分間の連続運転を2回行い、吸引流量と土砂濃度を計測した。計測履歴を図一15に示すが、2回とも安定した流量と土砂濃度による圧送ができ、平均土砂濃度8%程度、平均流量8.3m³/分であり、浚渫能力50m³/hを確認できた。

c) 圧縮空気混入による圧送性への影響

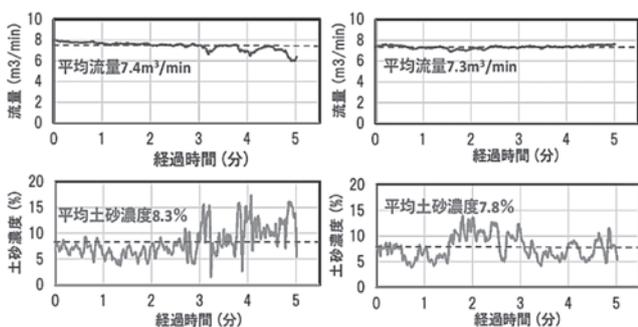
圧縮空気を0～3m³/分混入した各ケースの管内圧力計測値から算出した流量係数Cを表一5に示す。PG4～PG6の区間(270m)では、0から1m³/分にすると土砂水でCがわずかに大きくなったが顕著な差はなかった。一方、2～3m³/分に増やすと

清水・土砂水ともCは小さくなり、管内抵抗が増加する結果となった。今回は土砂濃度が比較的低い条件であったが、圧送性向上の可能性のある空気量は1m³/分以下とわかった。高濃度条件による圧縮空気混入時の圧送性への影響については、今後再確認が必要と考えられる。

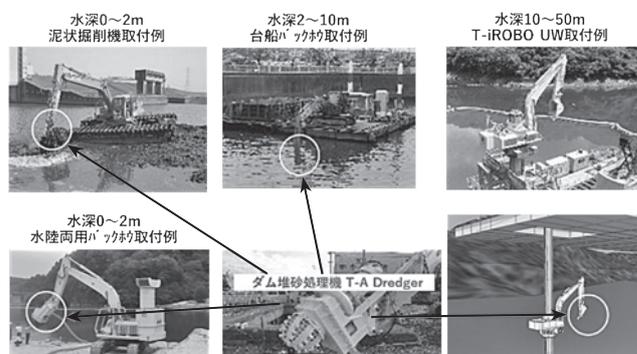
6. おわりに

巨礫等を含む土砂から細粒土砂を分別吸引し、堆砂の土質や粒度の違いに対して先端開口度とスクリーン回転数の組合せにより土砂濃度調整可能な分別吸引アタッチメントの開発ができた。堆砂の土質や粒度の違いに対して調整可能なパラメータを装備することにより、多様な性状の堆砂に対応可能であることを示すことができた。

今回開発したダム堆砂分別吸引アタッチメント「T-A Dredger」は、実証試験に用いた水陸両用バックホウでの浅水深(水深3m程度)浚渫以外にも、図一16に示すようなあらゆる水深の浚渫に適用できる特徴を持つ。また表一6に示すように大規模な仮設が不要で、コンパクトな設備でありながら、従来工法に匹敵する浚渫能力50m³/hを実現できるメリット



図一15 連続運転時の流量と土砂濃度履歴



図一16 水深に適應したベース機への装着例

表一5 空気混合量と流量係数の関係

	空気量 (m ³ /min)	流量 (m ³ /min)	土砂濃度 (%)	損失水頭 hf (m)		動水勾配 S		流量係数 C	
				PG1-2	PG4-6	PG1-2	PG4-6	PG1-2	PG4-6
清水	0	7.52	0.10	3.16	13.62	0.043	0.050	169	156
	1	8.00	0.00	3.67	15.35	0.050	0.057	166	155
	2	7.59	0.10	3.16	15.76	0.043	0.058	171	145
	3	7.21	0.29	2.96	14.94	0.040	0.055	168	142
土砂水	0	7.33	4.43	4.10	14.75	0.056	0.055	143	145
	1	7.41	4.41	4.13	14.55	0.057	0.054	144	148
	2	7.33	4.85	4.21	16.00	0.058	0.059	141	139
	3	7.29	4.54	3.91	15.83	0.054	0.059	146	139

表一6 従来の浚渫方法との比較

	グラブ浚渫	バックホウ浚渫	ポンプ浚渫	本法
使用機械	グラブ浚渫船	バックホウ浚渫船	①マイクロポンプ船 ②ポンプ浚渫船	①浅水バックホウ ②バックホウ台船 ③T-iROBO UW (クレーン台船)
運搬方法	土運船	土運船	パイプライン圧送	パイプライン圧送
適応土質	粘性土～礫混り土	粘性土～礫混り土	粘性土～砂質土 (礫混り不可)	粘性土～礫混り土
巨礫・沈木対応	浚渫後陸上で選別	浚渫後陸上で選別	浚渫不可	水中で選別
適応水深	-2～25m	-2～10m	①-2～-10m ②-2～-25m	①0～-2m ②-2～-10m ③-10～-50m
能力	100m ³ /hr (2.5m ³ バケット)	50m ³ /hr (1.0m ³ バケット)	50m ³ /hr (150kWポンプ)	50m ³ /hr (55kWポンプ)

がある。本機が今後のダム堆砂対策工事（浚渫等）に広く活用していければと考えている。またダム堆砂処理を含みリニューアル事業の推進が期待されている中、本稿の技術がその一助になれば幸いである。

JCMA

《参考文献》

- 1) 宮川仁, 本山健士ら: 吸引工法 (潜行吸引式排砂管) の現場適用に向けた塵芥等の前処理手法に関する一検討, 土木学会第72回年次学術講演会, VI, pp.1703-1704, 2017
- 2) 宮川仁ら: スラリー輸送における土砂濃度計測の自動化の試みと潜行吸引式排砂管の排砂特性, 土木学会第73回年次学術講演会, II, pp.149-150, 2018

【筆者紹介】

佐野 和幸 (さの かずゆき)
大成建設㈱
土木本部 機械部
メカ・ロボティクス推進室
次長



新井 博之 (あらい ひろゆき)
大成建設㈱
土木本部 土木技術部
ダム技術室
課長

