

# 底泥置換覆砂工法の開発と施工

## THE DEVELOPMENT AND THE CONSTRUCTION METHOD OF A NEW TYPE OF SAND CAPPING METHOD BY SAND-UPWELLING SYSTEM

大谷英夫<sup>1</sup>・上野成三<sup>1</sup>・小林峯男<sup>2</sup>・岡田和夫<sup>3</sup>・織田幸伸<sup>4</sup>

Hideo OHTANI, Seizo UENO, Mineo KOBAYASHI, Kazuo OKADA, Yukinobu ODA

<sup>1</sup>正会員 工修 大成建設(株)技術センター土木技術研究所海洋水理研究室  
(〒245-001 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1)

<sup>2</sup>正会員 大成建設(株)土木本部土木技術部海洋設計技術室  
(〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1)

<sup>3</sup>正会員 工修 大成建設(株)エコロジー本部最終処分場・環境保全グループ (同上)

<sup>4</sup>正会員 工修 大成建設(株)広島支店  
(〒730-0041 広島市中区小町2-30)

As a water quality purification measure for areas such as lakes, a sand capping method by sand-upwelling system was developed. This method involves welling up clean sand from below contaminated sludge by using a water jet. The disposal of sludge and the acquirement of pure sand are not necessary like dredging and conventional sand capping works. Besides, the ecosystem will hardly be disturbed by this method.

A scale model test and field tests at Lake Suwa were carried out to study sediment purification effects, sand capping conditions and turbidity range. As a result, it was demonstrated that sand capping was succeeded by this method. Some characteristics of this method were revealed, the thickness and the area of the sand capping depended on the jet discharge rate and the sand diameter, the turbidity range was very small caused by this method. After seven months later, the field observation was carried out in Lake Suwa. The thickness of the sand capping layer and the aerobic environment were maintained. Also, many Limnodius appeared in the sand capping area.

**Key Words** : Sediment quality purification, water quality purification, dredging, sand capping works, Lake Suwa

### 1. はじめに

湖沼や内湾などの閉鎖性水域では、アオコ・赤潮の発生や貧酸素化問題に悩まされている。水質浄化対策として汚濁底泥の浚渫や覆砂が実施されているものの、浚渫土の処理場・捨場や砂の入手が困難という課題を抱えている。そこで、著者らは、現位置で底泥浄化が可能な「底泥置換覆砂工法」を開発した。底泥置換覆砂工法は、底泥下の砂をジェット水流により浮上させ底泥を覆砂する新技術である。

室内実験および平成12年11月および平成13年11月に長野県の諏訪湖で2回の実証実験を経て本工法を開発した。同時に諏訪湖実証実験では覆砂後の追跡調査を行い環境改善に効果があることを確認した<sup>1)2)3)</sup>。平成14年には宍道湖において試験工事(国土交通省)に採用され、湖沼における施工方法を確立すると同時に、その有効性を確認した。また、現在海上工事の施工方法について研究を

続けている。

本論文では、底泥置換覆砂方法の開発経緯を述べると同時に、本工法の原理、特徴および本工法の環境に対する効果について実験結果、現地調査結果から述べる。また、底泥置換覆砂工法の標準的な施工方法について説明する。

### 2. 底泥置換覆砂工法の開発

#### (1) 原理と特徴

底泥置換覆砂工法の原理を図-1に示す。湖底をジェット水流で掘削しながらジェット管を砂質土層まで沈める。さらに、水流を流しながらジェット管が沈降していくにつれて、ジェットにより掘削された砂が注入された水とともにガイド管を通して上方に排出される。水と砂は混合し、密度流となって同心円上に広がることにより覆砂が行われる。多量の砂を含んだ水流がガイド管

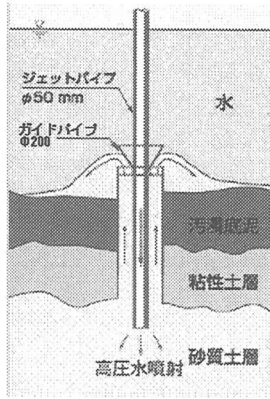


図-1 底泥置換覆砂工法の原理

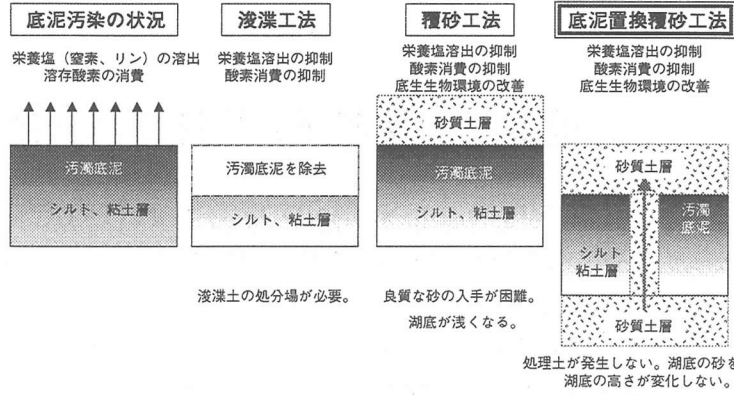


図-2 底泥置換覆砂工法と他工法との比較

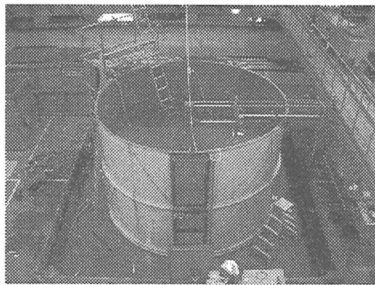


写真-1 実験装置



写真-2 覆砂状況

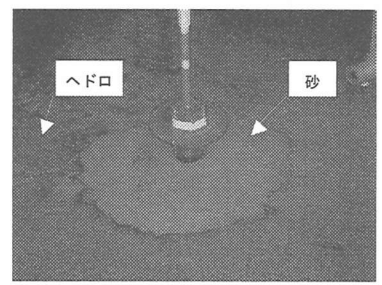


写真-3 覆砂後の状況 (平面)

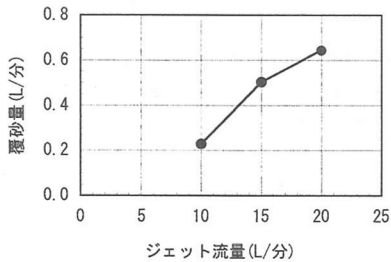


図-3 覆砂量とジェット流量の関係

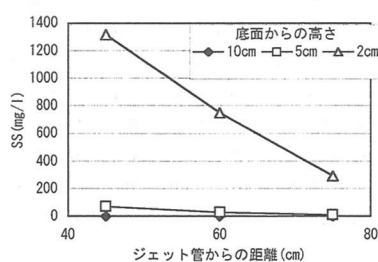


図-4 濁度分布

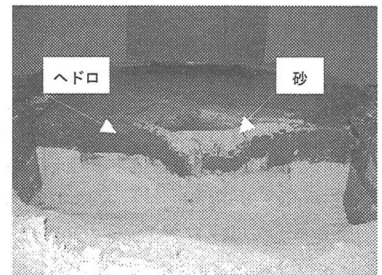


写真-4 覆砂後の状況 (断面)

を通過して汚濁底泥層上に覆砂される。この際、ガイド管の口から流出する砂はスムーズに汚濁底泥上に沈降するので、濁りや浮泥の巻き上げが小さい。

本工法の概念図と他工法の比較を図-2に示す。本工法を浚渫工法と比較すると、汚濁底泥の除去がないので浚渫土の処理場問題が発生しない。また、従来の覆砂工法と比較すると、本工法は底泥下部に堆積している砂を利用するため砂入手の必要がないこと、湖底が浅くならず貯水容量が変化しないことなどの長所がある。覆砂工法による水質浄化・環境修復効果として、底泥の酸素消費量や栄養塩溶出量が低減され湖水の貧酸素化・富栄養化が抑制されること、湖底環境が砂質土系の好気性環境に変わり底生物や水生植物が復活することなどがあげられる。

## (2) 室内水理実験

### a) 実験方法

本工法の覆砂特性とにごりの拡散範囲を調べるために水理実験を実施した。円筒水槽(D4.6m×H3m, 写真-1)内に砂層(厚さ:85cm,  $D_{50}$ :96 $\mu$ m), 底泥層(厚さ:15cm,  $D_{50}$ :5 $\mu$ m), 水層(水深:1m)の3層モデルを構築し、ジェット流量は10,15,20l分と変化させて、覆砂厚の分布と濁りの拡散範囲を計測した。実験縮尺は後述する諏訪湖実証実験の1/4とした。

### b) 実験結果

写真-2は覆砂中の状況である。吹き上がった砂が上方に拡散しないように、ガイドパイプの上端にツバ(傘)がついている。砂混じり水は、ガイドパイプの上端から出ると流れを下向きに変え、ガイド管の外側を下方に流下する。覆砂後の砂の広がりや覆砂厚の断面分布を写真-3, 写真-4に示す。ヘッド上面と覆砂層の境目は明確で、覆砂中のヘッドと砂との混合がないことがわかる。覆砂半径は20~30cmの範囲で、その厚さはジェットパイプの近傍で大きく、距離が離れるにしたがって減少した。

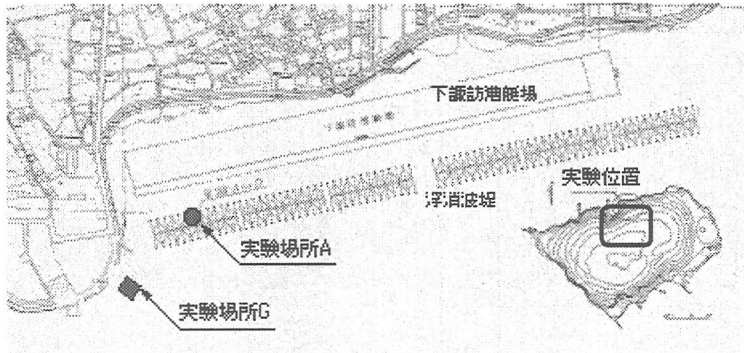


図-5 実験場所

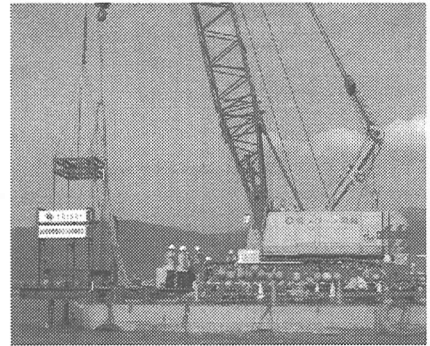


写真-5 クレーン台船と覆砂機

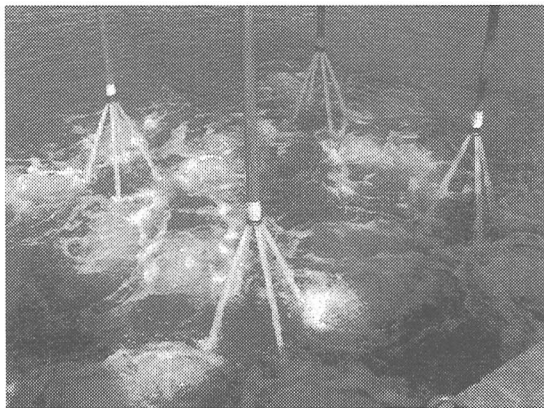
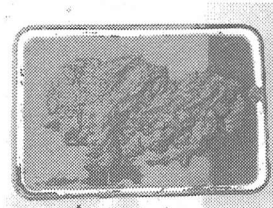
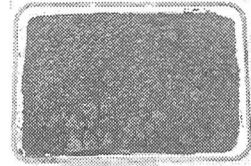


写真-6 ジェットの噴出状況



(a) 覆砂前のヘドロ



(b) 覆砂後の砂

写真-7 覆砂前後の底質

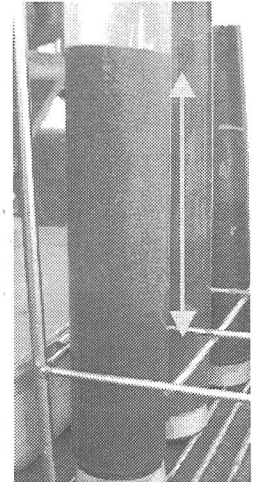


写真-8 サンプルしたコア

矢印：砂層

また、流量が大きいほど覆砂量も大きくなった(図-3)ことから、所用の覆砂厚を満たすためには、ジェットパイプの配置間隔およびジェット流量の調整が必要であることが明らかとなった。

一方、施工中の濁りについては、写真-2でも明らかのように、底面近傍の5cm程度に限定され、それより上層ではほとんど濁りが発生しなかった(図-4)。この理由は以下の通りである。先に述べたように砂混じり水は、ガイドパイプの上端から出ると流れを下向きに変える。これは砂の沈降によりガイドパイプから湧き出した水も下向きに連行される。このため、濁りの原因となる砂の細粒分も水と一緒に下向きの流れに取り込まれ、濁りは上方へ巻き上がらない。

### (3) 諏訪湖実証実験

#### a) 実験概要

実証実験は諏訪湖の北部水域において平成12年11月と平成13年11月の2回実施し、本工法の覆砂特性、底質浄化効果、濁りの拡散状況を調べた。実証実験状況を写真-5に示す。台船上のクレーンにより、ジェット管(径50mm)とガイド管(径200mm)を4セット設置した架台を吊り下げ、ジェット水流を噴射しながらジェット管を湖底中へ貫入した。主な実験諸元は、水深3~4m、底泥層厚さ2m、ジェット流量400 l/分(1本

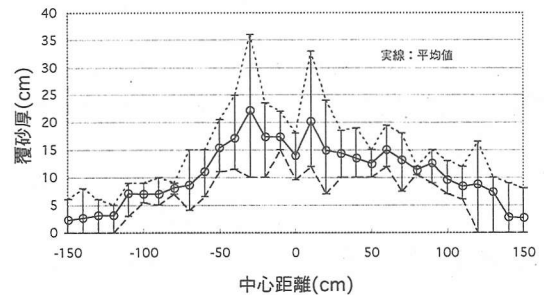


図-6 覆砂厚分布(実験場所A)

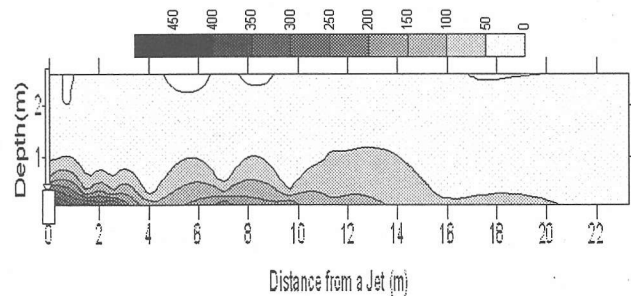


図-7 浮遊物質濃度SSの分布(単位mg/l)

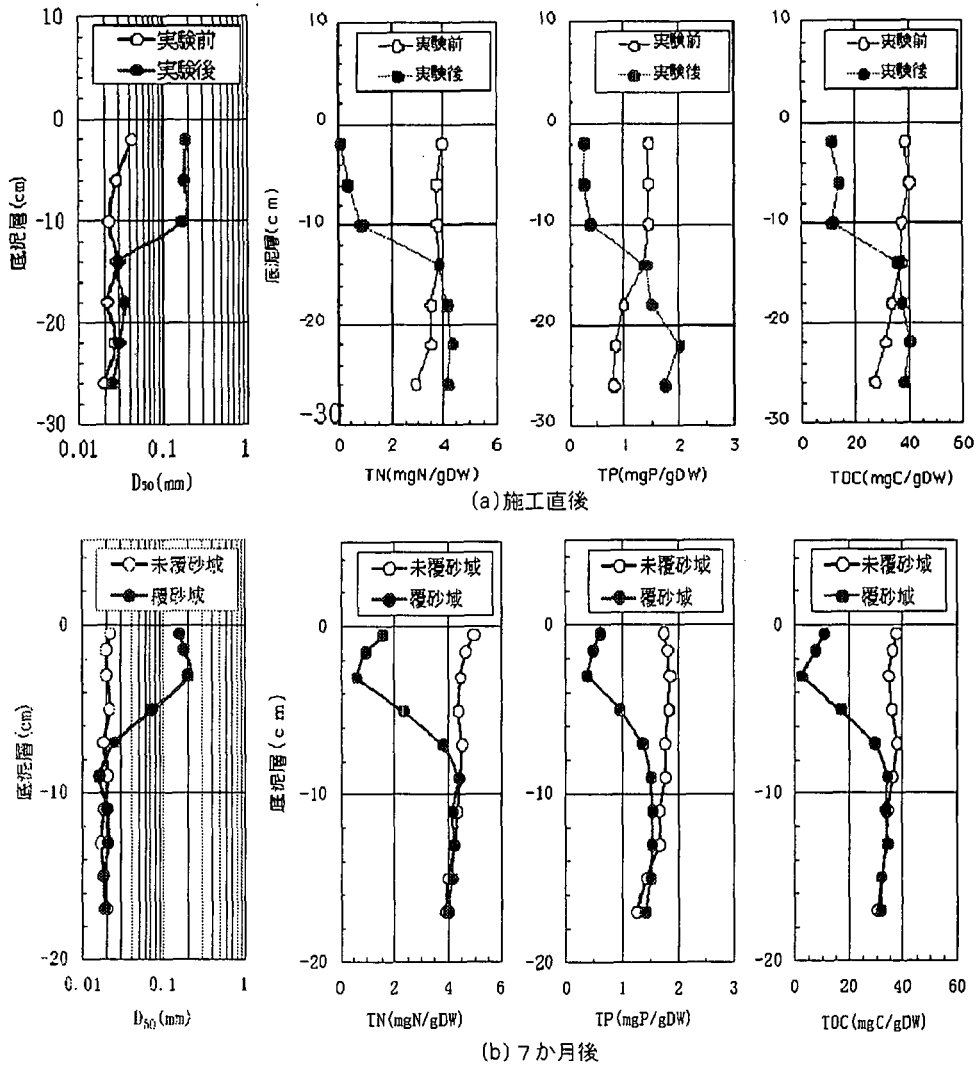


図-8  $D_{50}$ ・全窒素・全リン・全有機炭素断面分布

当たり), ジェットパイプの間隔1.5mである。ジェット噴射模擬状況を写真-6に示す。覆砂結果はダイバーにより採取した底泥コアを2cm間隔でスライスし, 粒度分布, 全有機炭素TOC, 全窒素TN, 全リンTPなどの各種底質項目を分析した。また, 底生生物の種類・数の同定, 濁りの拡散範囲, 底質の酸素消費量・栄養塩溶出量なども調べた。

### b) 実験結果

写真-7は, 湖底のヘドロと覆砂した砂を示す。実験前は湖底のヘドロと砂が混ざることが心配されたが, 室内実験と同様, ヘドロが混じらない清浄な砂で覆砂できた。砂粒径は場所Aで $D_{50}=0.2\text{mm}$ , 場所Gで $D_{50}=0.4\text{mm}$ であった。写真-8は覆砂後, 乱さないようサンプルした底泥コアである。表層に砂層が形成され覆砂できたことがわかる。図-6は実験場所Aで得られた覆砂厚分布の一例である。ジェット管が位置する中心部で覆砂厚が大きく, ジェット管中心より半径50cmの範囲では, 15cmから20cmの覆砂厚が確保された。

本工法によるごりの発生範囲として, 覆砂施工中に計測した浮遊物質濃度SSの分布を図-7に示す。濁りの発

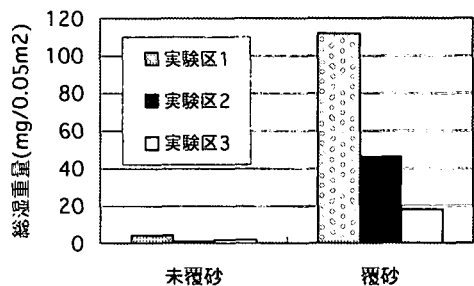


図-9 未覆砂域と覆砂域(覆砂後7ヶ月)のユリミズの総湿重量(0.05 $\text{m}^2$ 当たり)

生は, 平面的にはガイド管を中心に, 鉛直方向にはガイド管出口より低い湖底近傍に限定されることが分る。これは室内実験と同様の結果で, ガイド管出口からの砂の沈降が濁りの発生を抑制した。

### c) 底質浄化結果

本工法の覆砂状況として, ジェットパイプの周囲約1mの範囲で厚さ10~30cmの覆砂層がダイバーの目視により確認された。実験前後の中央粒径 $D_{50}$ , TN, TP, TOC, の鉛直分布を図-8(a)に示す。採取した底泥コアの



図-10 試験工事場所

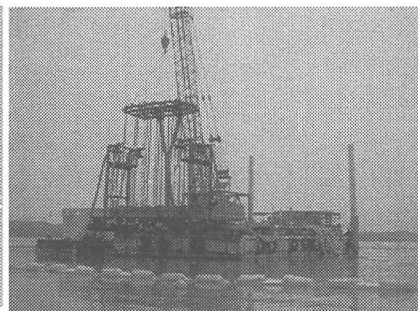


写真-10 クレーン台船

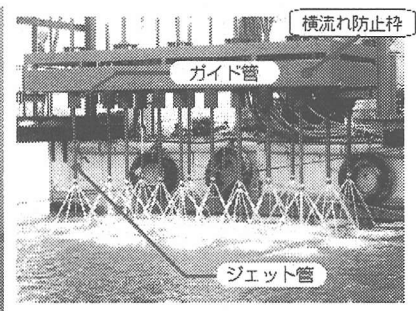


写真-11 覆砂装置とジェット噴出模擬状況

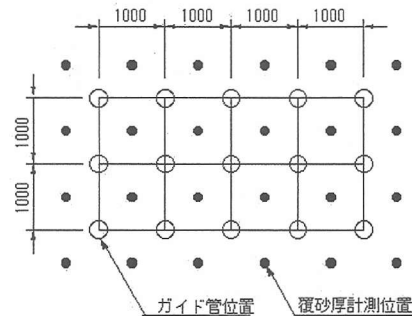


図-11 ガイド管配置および覆砂厚計測位置

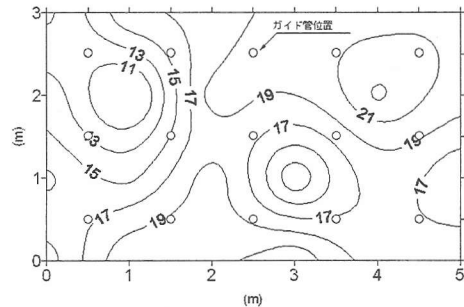


図-12 1ユニット内の覆砂厚の計測結果の例 (単位cm)

位置は4本のジェットパイプの中心である。実験前では全層にわたり $D_{50}$ が0.02~0.04mmのシルト質土であったのに対して、実験後ではシルト質土の上に $D_{50}$ が約0.2mmの細砂が厚さ約10cmで覆砂されたことが分かる。底質の栄養塩の変化については、実験前では、全層にわたりTOCが25~40mgC/gDW, TNが3~4mgN/gDW, TPが0.8~1.5mgP/gDWと有機汚濁化していたのに対して、実験後では、表層10cmの覆砂層部でTOCが約10mgC/gDW, TNが1mgN/gDW以下, TPが0.4mgP/gDWと大幅に減少した。以上より、本工法により汚濁底泥上に混合することなく砂層が確実に覆砂され、表層の有機物含有量が1/3以下に低下することが確認された。

図-8(b)は施工後7ヵ月経った平成13年6月の計測結果である。砂層は覆砂範囲全域で確認された。 $D_{50}$ の鉛直分布から覆砂後7ヶ月では表層1cmで細粒分が増加している傾向にあるものの、その下層では砂質土層が維持されていた。底質に関しても覆砂直後の底泥(図-8(a))と同様に、底質の表層では全窒素・全リン・全有機炭素の全てが覆砂前に比べて大幅に低下した状態を維持していた(図-8(b))。

#### d) 底生生物環境の再生効果

覆砂実験区は、水深約4mと深く、貧酸素化や日射量不足の影響を受けるため、水生植物も底生生物も非常に少ない状況であった。しかしながら、覆砂実施から7ヶ月後の調査では、底生生物として唯一ユリミミズ(*Limnodrilus hoffmeisteri*)を(図-9)、ダイバーの目視観察によるとコカナダモ(*Elodea nuttallii*)の繁茂を確認した。ユリミミズは未覆砂域に比べて覆砂域に圧倒的に多く生

育しており覆砂により底生生物に良好な環境を提供できたと言える。

以上より、本工法により、貧酸素化や日射量不足の影響を受けにくい比較的水深の浅い区域に覆砂を行えば底生生物・水生植物の再生効果が期待できることが確認できた。

## 4. 底泥置換覆砂工法の施工方法

### (1) 施工方法

諏訪湖や穴道湖(後述)での試験工事をへて本工法の施工方法を確立した。ここではその概要を述べる。

#### a) 施工前調査

施工計画に当たって、現地の地形、土質、水質、水文、海象、植生、生物、その他の制約条件に関する資料調査を行った。また、試験工事においては小規模の作業船を用いて現地で試験覆砂を行い、所要の覆砂厚を満足する覆砂機および施工方法を計画した。本工法に特徴的な施工計画設定・把握が必要な条件を表-1に示す。

表-1 本工法に特徴的な施工条件

条件	影響項目
平均覆砂厚	ジェット管ピッチ, 施工時間
水深	作業船の大きさ
砂粒径	ジェット流量
粘性土層厚・砂層厚	ジェット管の長さ



一般に、平均覆砂厚は、覆砂の機能の面から設定される。栄養塩の溶出を制御するために適切な覆砂厚を設定しなければならない。一方、覆砂工が与える底生生物へのインパクトを考えると、覆砂厚が薄い方がよいと考えられる。覆砂厚の設定方法については今後研究を進めていくべきでものであると考えられる。覆砂厚に関する施工性については、ヘドロ下の砂層厚が大きな自然条件では、厚い平均覆砂厚を施工しやすいと言える。本工法は連続的・面的に覆砂するため、覆砂厚を薄くできるのも特徴の一つである。試験工事では、所要の平均覆砂厚を満足するため、施工場所の底泥下の砂層厚に対して、ジェット管のピッチ、施工時間を決定した。

#### b) 施工機械

試験工事で使用した機械を列举すると、スパッド付きクレーン台船、覆砂機（ジェット管、ガイド管）、水中ポンプ、配管類、GPSである。覆砂機のうちジェット管は台船のクレーンにより吊り下げ、ガイド管は台船にホイストを取付けて吊り下げた。機械は非常にシンプルな組み合わせが実現できた。なお、機械の規模は、工期、覆砂面積に応じて決定される。

#### c) 覆砂船の位置決め方法

覆砂船の位置決め方法はGPSを用いて行った。固定局を陸上に設定し、移動局を覆砂船に設定した。現在、作業範囲は半径約5kmを標準としている。

#### d) 施工サイクル

施工サイクルは次の通り行った。

①覆砂船移動位置決め、②スパッド打設、③ガイド管ジェット管セット、④ジェットポンプ 運転始動、⑤ガイド管ジェット管底泥層内貫入、⑥ジェット管砂層内貫入置換覆砂、⑦ガイド管ジェット管引抜き、⑧スパッド引抜き

#### (2) 湖沼における施工例（宍道湖試験工事）

平成14年3月より10月までの期間で、宍道湖（図-10）において試験工事を実施した（国土交通省中国地方整備局出雲工事事務所発注）。砂層・土質・環境に関する事前調査を経て、15本のジェット管を装備した台船により2500m<sup>2</sup>の覆砂工事を実施した。覆砂装置はジェット管を1m間隔で15本（3×5）格子状に設置し、1回の施工範囲（1ユニット）を15m<sup>2</sup>とした（図-11）。代表的な覆砂の出来形を図-12に示す。覆砂厚の目標値10cmに対して、10cmから24cm平均15cmの覆砂を行った。覆砂工事は、平成14年7月末に終了し、その後覆砂による底質浄化効果、底生生物の生息状況などの環境調査を行った。現在、調査およびデータの取りまとめ中である。本工事の主な特徴は次の通りであった。

- ・粒径D<sub>50</sub>=0.067mm～0.085mmのシルト分が多く含まれた砂であった。
- ・砂の細粒分が覆砂区から横に流失しないようガイド管に横流れ防止枠（写真-11）を設置し覆砂厚を確保した。

#### (3) 海上における施工の検討

海洋では、河川や湖沼に比べ大規模な施工が可能である。しかし、水深も大きく波浪条件は湖沼に比べ厳しい。一般的な覆砂船の一例を図-13に示す。図-13の覆砂船は、1連装当り9本のジェットパイプユニットを装備したもので、3連装で1サイクル当り108m<sup>2</sup>の覆砂が施工可能である。ジェット管の標準ピッチは2.0mで正方形配置とした。

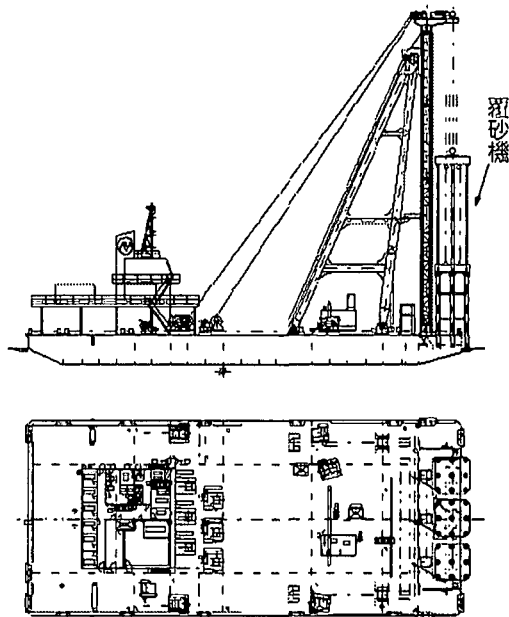


図-13 海上覆砂船（3連装タイプ）

## 6. まとめ

「底泥置換覆砂工法」の室内水理実験、現地実証実験、試験工事を実施し、本工法の覆砂特性、濁り拡散特性、底質浄化効果、環境修復効果を明らかにした。その結果、本工法により湖底にあった砂が確実に汚濁底泥上に覆砂され、良好な底泥浄化効果、および、底生生物・水生植物の再生効果が発揮されることを確認した。また、底泥置換覆砂工法の施工方法を示し、実例を紹介した。

なお、本工法は平成13年度の国土交通省公共工事の試行活用技術に選定された。

#### 参考文献

- 1) 松木田正義・小林峯男・上野成三・岡田和夫・丸山邦男：底泥置換覆砂工法の開発，土木学会第56回年次学術講演会，VII，pp.66-67，2001.
- 2) 松木田正義・小林峯男・友井宏，勝井秀博，上野成三・大谷英夫・岡田和夫・丸山邦男：底泥置換覆砂工法の現地実証実験，土木学会第57回年次学術講演会，VII-246，2002.
- 3) 勝井秀博：底泥置換覆砂工法の開発，第28回底泥浄化セミナー，底質浄化協会pp.90-95，2002