

底泥置換覆砂工法の開発と環境改善効果

THE DEVELOPMENT OF A NEW TYPE OF SAND CAPPING METHOD BY SAND-UPWELLING SYSTEM AND ITS EFFECT ON THE ENVIRONMENTAL IMPROVEMENT

大谷英夫¹・上野成三¹・勝井秀博²・小林峯男³・松木田正義³

¹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)

²正会員 工博 大成建設(株)技術センター土木技術研究所(同上)

³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)

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、現位置で底泥の浄化が可能な「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。

平成12年11月および平成13年11月に長野県の諏訪湖で実証実験を実施した。実験の目的は、本工法の実用化を目指し、揚砂量・覆砂範囲を確認するとともに、効率的な施工方法を追求すること、本工法により湖底が生物にとって望ましい環境に改善されること等を確認することである。また、平成14年度には国土交通省宍道湖底泥置換覆砂試験工事において、施工方法が確立されると同時に、その有効性が確認された。

現在、実用化に向けた取り組み¹⁾²⁾はほぼ完了した。本

報では、開発の過程で得られた本工法の原理、特徴および水質や底質の改善効果について実験結果と現地の環境調査結果を用いて説明する。また、施工方法についても報告する。

2. 底泥置換覆砂工法の原理と特徴

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を通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ほとんど発生しない。

本工法の概念図と他工法の比較を図-2に示す。まず、本工法を浚渫工法と比較すると、汚濁底泥の除去がない

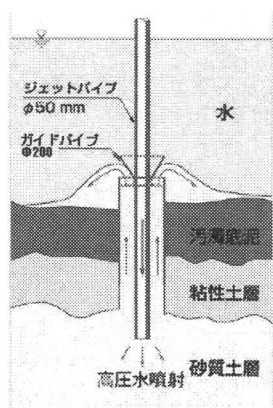


図-1 底泥置換覆砂工法の原理

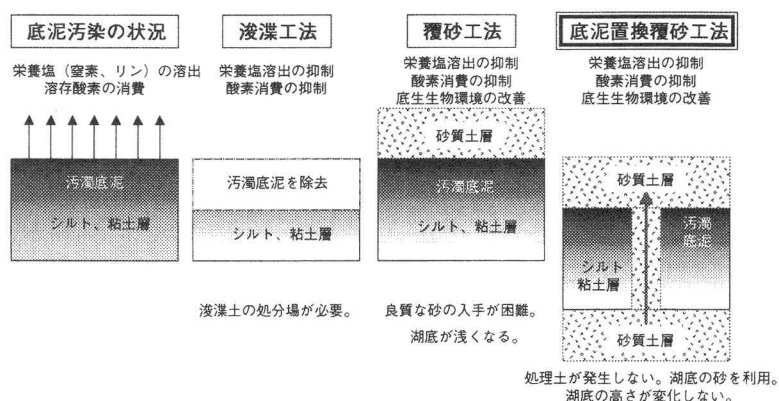


図-2 底泥置換覆砂工法と他工法との比較



写真-1 実験装置

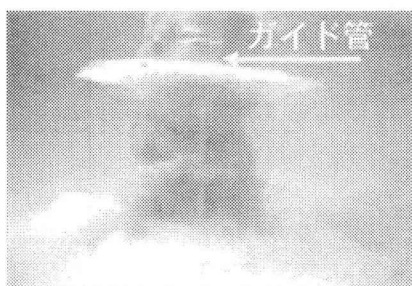


写真-2 覆砂状況

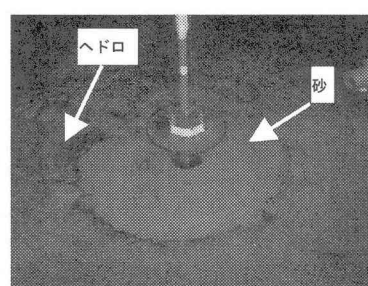


写真-3 覆砂後の状況（平面）

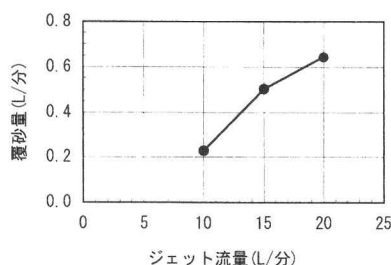


図-3 覆砂量とジェット流量の関係

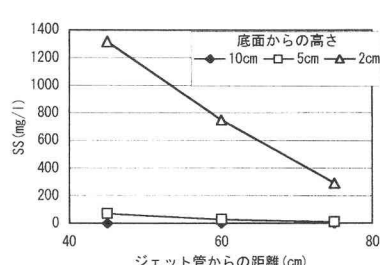


図-4 濁度分布

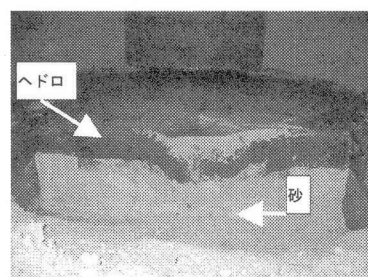


写真-4 覆砂後の状況（断面）

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生物や水生植物が復活することなどがあげられる。

3. 室内水理実験

(1) 実験方法

本工法の覆砂特性とにのり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 μ m）、底泥層（厚さ:15cm, D_{50} :5 μ 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。

(2) 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。覆砂されたヘドロ上面と覆砂層の境目は明確で、覆砂中のヘドロ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。また、流量が大きいく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。

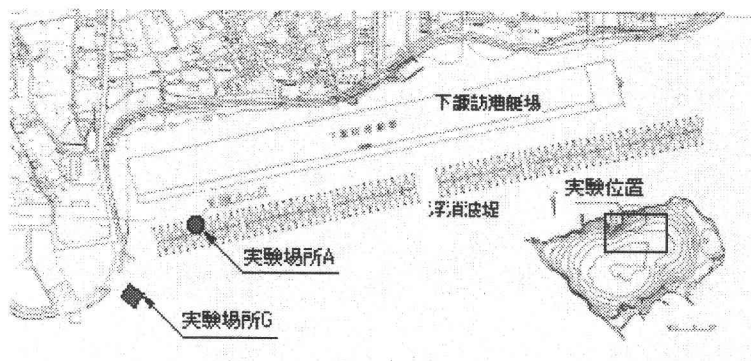


図-5 実験場所

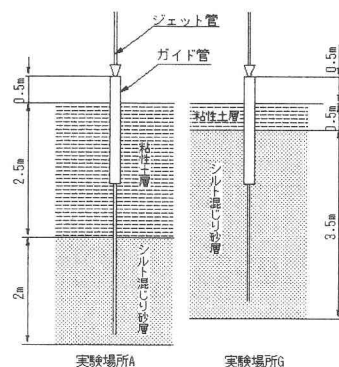


図-6 実験土層

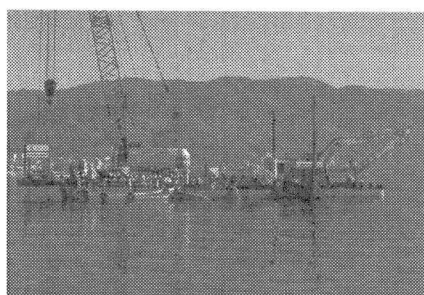


写真-5 スパッド付組立台船



写真-6 ガイド管およびジェット管

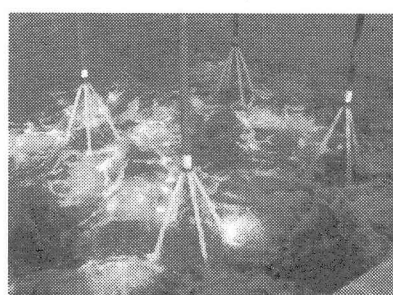


写真-7 ジェットの噴出状況

一方、施工中の濁りについては、写真-2でも明らかなように、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。

15m×15mの広範囲に覆砂し、より実施工に近い作業を実施し、環境調査も行った。主な実験諸元を表-1、表-2に示す。

表-1 実験条件

	場所A	場所G
水深	3.7m	2.7m
砂粒径 D_{50}	0.2mm	0.4mm
土質条件	図-6	

4. 諏訪湖実証実験

(1) 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（その1）と平成13年11月（その2）の2回実施した。

「実験その1」では、実験場所Aにおいて本工法の実用化を判断する基礎実験を行うとともに、7m×7mの範囲を覆砂し、施工直後およびその7ヵ月後の平成13年6月に生態系の復元に関する環境調査を行った。環境調査の項目は、粒度分布、全窒素・全リン・有機炭素、酸素消費速度と栄養塩溶出速度、生物調査である。

「実験その2」では、実験場所AおよびGにおいて覆砂厚の特性、濁りの拡散状況を調べた。覆砂場所は、消波堤に近い場所Aと、15m×15mの範囲に連続覆砂を行う場所Gの2箇所とした（図-5）。場所Aでは1本のジェット管で、覆砂の出来型について詳細に調べた。場所Gでは、

表-2 使用機器

使用機器	形状・仕様	数量
組立台船	65tクレーン	1
水中ポンプ	200V, 37kW, H35m ジェット流量0.5m ³ /min, 吐出圧0.4MPa	1
ヘッダー管	φ150	1
ホース	φ38, 20m	4
ジェット管	φ38×6m	4
a. 1本セット：覆砂厚等確認試験用		
b. 4本セット：覆砂面積49m ² (7m×7m) 用		
ガイド管	φ200×1.5m	4
GPS		1

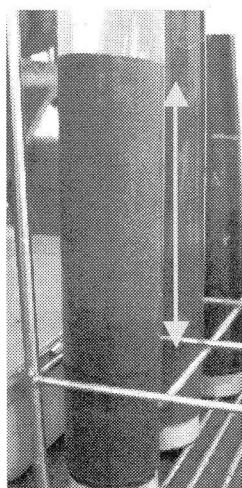


写真-8 サンプルしたコア
矢印：砂層

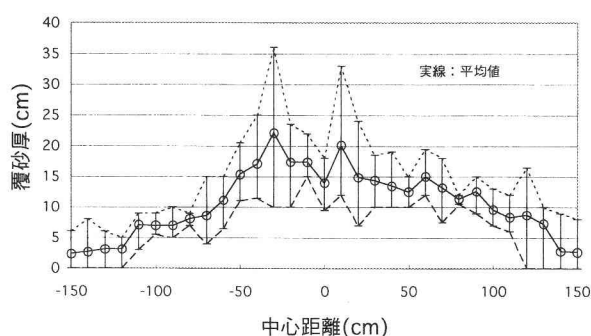


図-7 覆砂厚分布（実験場所A）

(2) 試験施工の方法

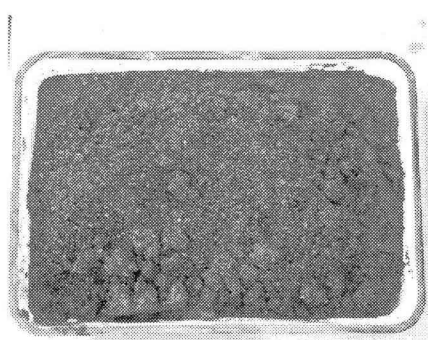
65tクローラクレーンを搭載したスパッド付組立台船（写真-5）に覆砂用設備を設置した。覆砂用設備（表-2）は、ガイド管、ジェット管（写真-6）、配管類、水中ポンプ、発電機（125KVA）から構成される。写真-7にジェット噴射状況を示す。ガイド管は、1.5m角の正方形吊り枠に4本配置し、ホイストで吊り下げた。ジェット管はガイド管と同様に1.5m角で配置しクローラクレーンで吊り下げた。ジェット管の長さは、粘性土層厚、砂層厚を考慮し全長6mとした。

所定の覆砂位置への移動は、台船をGPSで誘導し、係留ワイヤーのウインチ操作およびバックホーによる微調整により行った。覆砂位置ではオートレッドにより水深を確認した。組立台船に小型台船を併設し、小型台船上のハウス内にGPSおよびデータ取得用のパソコンを装備した。施工サイクルは次の通りである。

- 台船移動位置決め
- スパット打設
- ガイド管ジェット管セット
- ジェットポンプ 運転始動
- ガイド管ジェット管底泥層内貫入
- ジェット管砂層内貫入置換覆砂
- ガイド管ジェット管引抜き



(a) 覆砂前のヘドロ



(b) 覆砂後の砂

写真-9 覆砂前後の底質

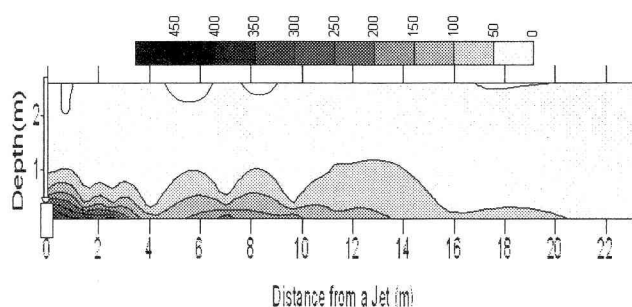


図-8 浮遊物質濃度SSの分布（単位mg/l）

h. スパット引抜き

施工後の覆砂厚は、ダイバーが採種したコア（写真-8）から読みとった。施工中の濁りは、船から濁度計により計測した。

(3) 実験結果および考察

写真-9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。図-7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の覆砂厚となった。

本工法によるに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-8に示す。濁りの発生は、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。

以上より、室内実験および現地実証実験より本工法による濁りの発生はガイド管の出口以下の湖底上の極近傍に限定され、それより上層ではほとんど発生しないことが確認された。



図-9 試験工事場所

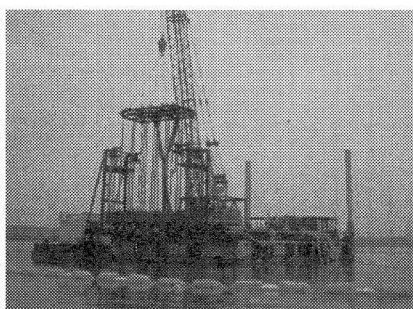


写真-10 クレーン台船

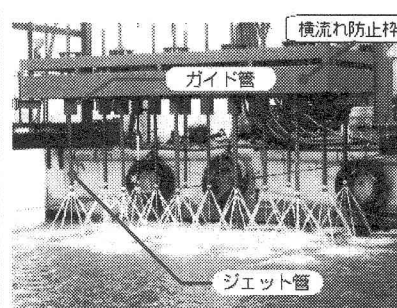


写真-11 覆砂装置とジェット噴出模擬状況

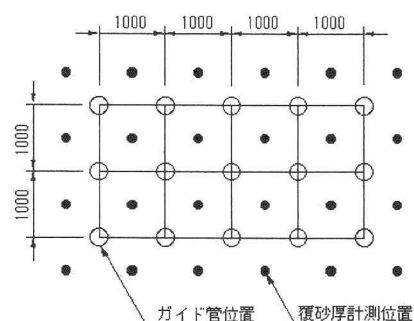


図-10 ガイド管配置および覆砂厚計測位置

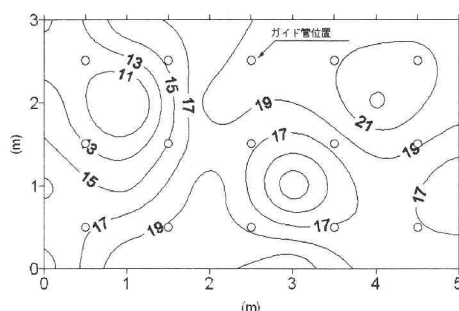


図-11 17ブロック内の覆砂厚の計測結果の例 (単位:cm)

4. 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-9) 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2500m²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回の施工範囲を15m²とした (図-10)。代表的な覆砂の出来形を図-11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、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る。

- ・粒径 D_{50} =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。

5. 底泥置換覆砂工法の効果

(1) 底泥浄化の結果

平成12年11月諏訪湖実証実験 (場所A)の覆砂状況は、ジェットパイプの周囲約1mの範囲で覆砂厚10~30cmであったこと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} 、TOC、TN、TPの鉛直分布を図-12(a)に示す。また、底泥コア資料の採種位置は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-12(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-12(a))と同様に、底質の表層では全窒素・全リン・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-12(b))。覆砂域 (覆砂後7ヶ月) と未覆砂域の不攪乱底泥カラムを用いて、酸素消費速度 (図-13) を計測した。覆砂域の酸素消費量は未覆砂域より小さく、約20%低下した。覆砂により好気性環境を提供できた。

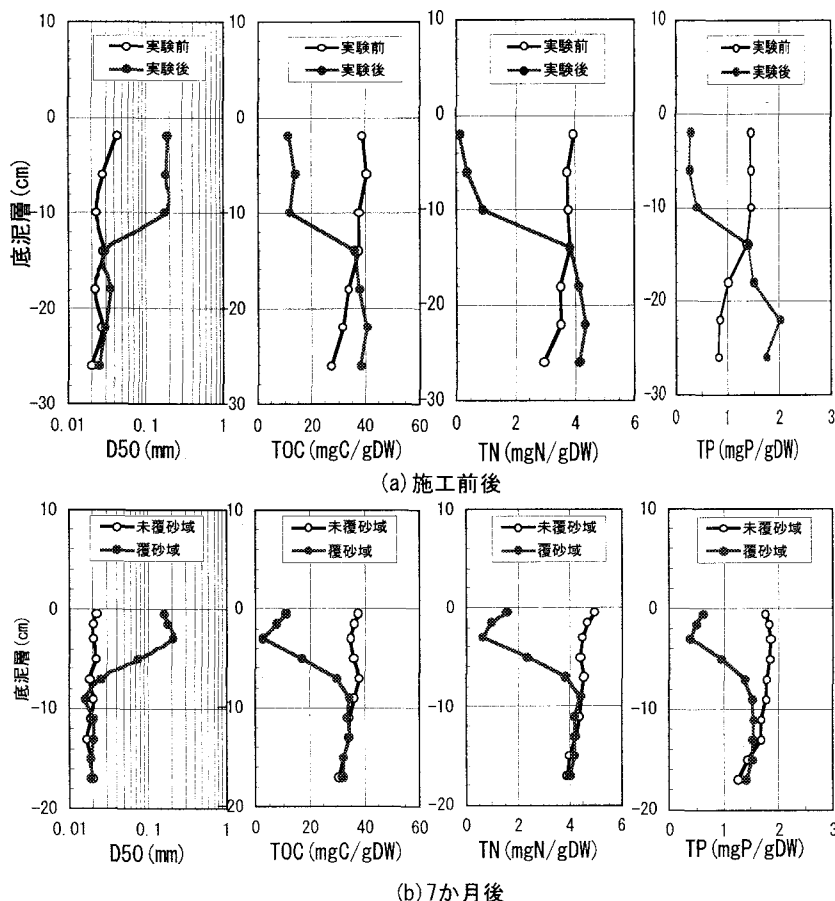


図-12 D_{50} ・全窒素・全リン・有機炭素断面分布

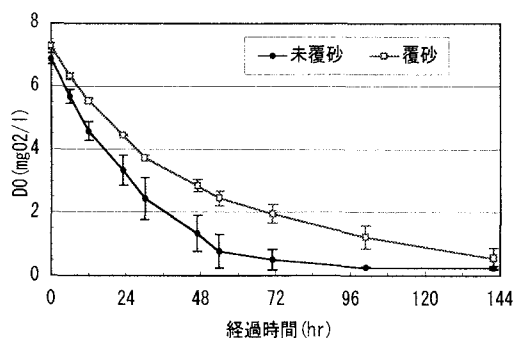


図-13 酸素消費速度

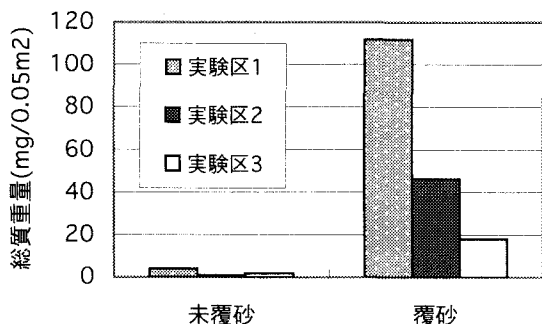


図-14 未覆砂域と覆砂域（覆砂後7ヶ月）の底生生物総湿重量（0.05m²当たり）

(2) 底生生物環境の再生効果

諏訪湖の覆砂実験区（場所A，7m×7m）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-14），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。図-14は、実験区7m×7mの中で3箇所サンプルした結果である。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。

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。今後，宍道湖，諏訪湖の追跡モニタリングを継続する予定である。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。

（2003. 4. 11受付）