

## 三河湾窪地の埋め戻し土砂投入時における 濁りの拡散特性と密度成層の効果

Dispersion Characteristics of Turbidity during Placing Dredged Sediments into Borrow Pits in Mikawa Bay

内藤了二<sup>1</sup>・井上徹教<sup>2</sup>・中村由行<sup>3</sup>・浦瀬太郎<sup>4</sup>・久野賢二<sup>5</sup>

Ryoji NAITO, Tetsunori INOUE, Yoshiyuki NAKAMURA, Taro URASE and Kenji KUNO

In Mikawa Bay, restoration has been conducted by placing dredged sediments into borrow pits. So far, few information are available for dispersion of turbid suspended sediments generated by placing. Thus, we conducted field observations on turbidity dispersion after placing dredged sediments for filling under different stratification conditions. When sediment placing was conducted under summer stratified conditions, density interface acted as a barrier for upward mass transfer so that generated turbidity was confined to a borrow pit. Whereas in a well-mixed conditions in fall, turbidity dispersed toward outside of the borrow pit. These findings will be utilized as basis for determination of construction time schedule for filling dredged sediments into borrow pits.

### 1. はじめに

我が国の戦後の経済発展や沿岸域埋め立て開発に伴い、安価な土砂の供給源である海底の土砂が掘削利用され、その結果、海砂採取跡地や海底土砂掘削跡地が、沿岸域の至る所に散見される。これらの浚渫窪地の存在は、海底地形の変化を通して生物生息・生産の場の直接的な消失をもたらしてきたばかりでなく、窪地を発生源とする青潮によって周辺の干潟・浅場生態系にも間接的な悪影響を及ぼしてきたと考えられている(国土交通省, 2005; 東山, 2004; 石田ら, 2006; 武田ら, 2006)。そのため、沿岸環境の修復のためにこれらの浚渫窪地等を埋め戻すことが必要であるとの認識が高まり、中央環境審議会総量規制専門委員会での答申や、交通政策審議会答申においても、積極的に窪地を埋め戻すことが必要であるとされている。今後の埋め戻し事業の進展によって沿岸環境の改善が進むことが期待されているが、埋め戻し後の環境回復効果の予測や評価手法などについて不明な点が多く(中村, 2006)、必ずしも埋め戻しが事業として進展しているとはいえない。内藤ら(2006)は、東京湾・三河湾の窪地において、浚渫土砂を利用した埋め戻し・環境修復を円滑に進めるために克服すべき技術課題をとりま

とめたが、浚渫窪地の埋め戻し工事における汚濁の発生状況については知見が乏しい。

窪地への土砂投入においては、平坦な一般海域への土砂投入時とは異なり、窪地という特有の地形条件に依存する濁りの拡散特性が存在すると予想されるが(大見ら, 2006)、窪地での土砂投入時の影響に着目した研究例は殆どなく、施工上の留意点については不明な点が多い。

本研究では、埋め戻しが進行中である三河湾の湾奥部海域において、密度成層の強度が異なる二つの時期(夏季・秋季)に、土砂投入時に発生する濁りの拡散特性を把握するとともに、濁りの拡散に対する密度成層の影響を調べ、施工計画策定への基礎情報を得るものとする。

### 2. 観測場所と方法

#### (1) 観測場所

三河湾の大塚沖窪地(愛知県蒲郡市大塚町地先)では三河港内で発生する浚渫土砂を用いた埋め戻しが、現在進行中である。大塚沖窪地は、周辺の現地盤水深(約4 m)よりも約3~4 m 深く掘り下げられた、容積180万 m<sup>3</sup>の規模である。

#### (2) 調査時の土砂投入の方法

三河港航路泊地(-12m)浚渫工事によって発生した浚渫土砂を用いた大塚沖浚渫窪地の埋め戻し工事を調査の対象とし、現地調査は、夏季(9月11-12日)及び秋季(10月11-12日)の中潮期に、大塚沖浚渫窪地南西部での土砂投入にあわせて実施した。調査場所を図-1に示す。

土砂投入に伴う濁りの拡散状況を把握するには、水質の変化を適切に把握できる距離、方角に調査地点を設定する必要があるため(白石ら, 2000)、事前調査を基に本調査時間中の潮流の主流向を想定して調査地点の配置を

|            |                                         |
|------------|-----------------------------------------|
| 1 正 会 員    | (独法)港湾空港技術研究所 研究官                       |
| 2 正 会 員 工博 | (独法)港湾空港技術研究所 主任研究官                     |
| 3 正 会 員 工博 | (独法)港湾空港技術研究所 研究主監                      |
| 4 正 会 員 工博 | 東京工業大学 理工学研究科 准教授<br>(現 東京工科大学応用生物学部教授) |
| 5          | 国土交通省中部地方整備局三河港湾事務所 係長 (現 近畿地方整備局)      |

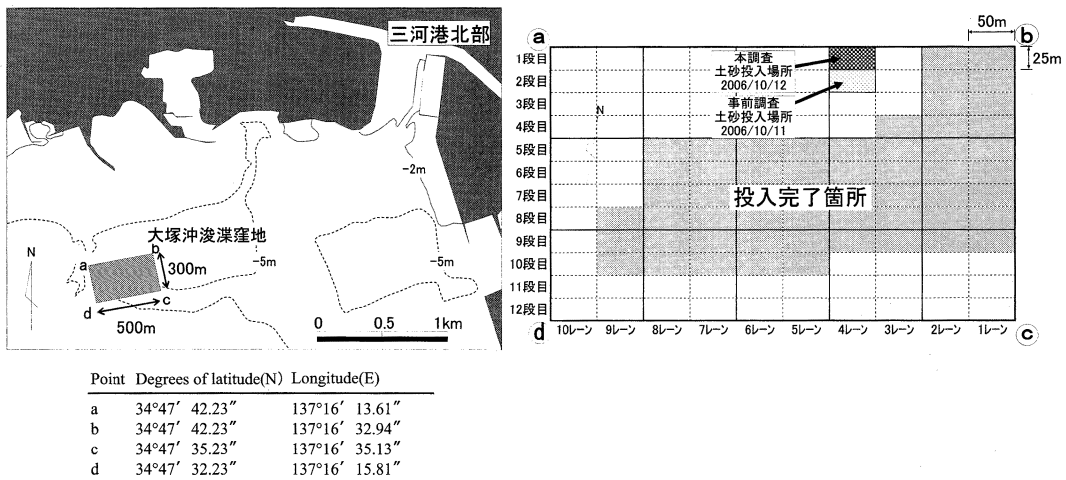


図-1 浚渫地内における土砂投入工事実施場所（秋季調査では、図の影の部分が既に土砂投入されていた）

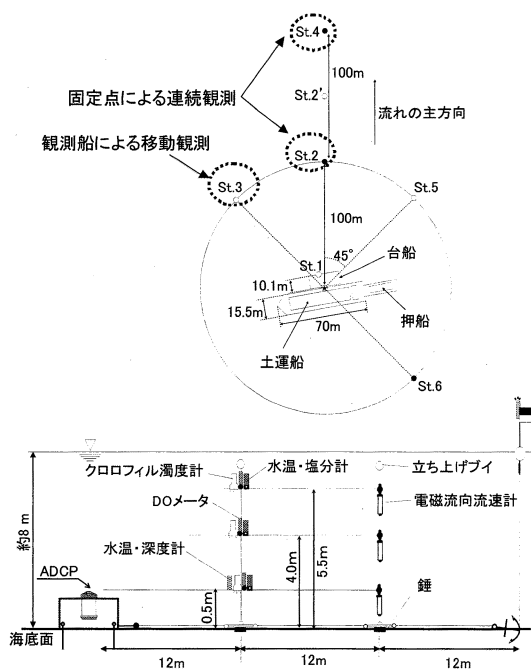


図-2 現地観測の地点配置

決定した。土運船と St.2, St.2 と St.4 の間隔を 100 m とし、土砂投入場所を中心として St.2 と同心円上に St.3, 5, 6 を図-2 の様に配置した。また、土運船を係留した台船を St.1 とした。さらに、St.2（夏季）及び St.2'（秋季）の位置で船上調査を行った。各地点の位置は GPS により測定した。夏季調査では下げ潮時、秋季調査では上げ潮時に調査を実施した。夏季調査では、事前調査を 9 月 11 日、本調査を 9 月 12 日における土砂投入にあわせて観測を行った。秋季調査では、事前調査を 10 月 11 日、本調

査を 10 月 12 日の土砂投入時に行った。図-1 に示すように周辺の海域は埋め戻しが進行していた。埋め戻し工事は、容積 2,000 m<sup>3</sup> 積の底開式土運船による直接投入方式で行われ、位置決めのための台船に土運船を係留した状態で浚渫土砂が約 1400 m<sup>3</sup> 投入された。土砂投入は、浚渫土砂の性状や積み込み時間の変化などにより、投入時間に幅が生じることが多い。夏季においては土砂投入が速やかに行われ、投入開始から全ての土砂の投入が約 2 分間で終わった。一方、秋季の本調査においては、投入開始後一時的に底扉閉鎖チェーンが土砂に食い込み底扉が開かない事態が生じたため、放水して土砂の落下を促し断続的に放水による土砂の落下が見られ、結局投入開始後 48 分後に土砂投入が完了した。

### (3) 観測内容

土砂投入に先立ち、投入土砂及び窪地内の堆積物を採取し、それぞれの粒度分布、含水率、強熱減量、有機炭素量の分析を行った。

St.1～St.6 の 6 地点においては多項目水質計（AAQ1183：アレック電子社製）を使用し、1 m 間隔で水温、塩分、DO 濃度、濁度、クロロフィル a、pH、ORP の鉛直分布を測定した。観測頻度は土運船到着前、土砂投入前、投入直後、投入後 20、40、60、120 分後とした。

また、St.2, 4 には水温、塩分、DO 濃度、濁度に関する自記式計測機器を上層（海面下 0.5 m）、中層（海底上 4.0 m）、下層（海底上 1.0 m）に設置し、下層にのみ水温深度計も設置した。さらに St.2, 4, 6 には、超音波ドップラー多層流向流速計（Instruments 社製 ADCP1200, ADCP600, 以下 ADCP と呼ぶ）を海底に設置し、流況、水質の連続観測調査を行った。

St.1, 2, 3, 5 の 4 地点では採水による水質調査も行った。バンドーン採水器を用い、土運船到着前、土砂投入

60分後の2回、上層、中層、下層の3層で船上より採水した。採取試料は、2 L 容ポリビンと100 mL 容 DO ビンに分取し、DO 試料は現地に於て直ちに固定した。他の試料は冷蔵保存後、分析室へ持ち帰り、SS、POC、強熱残留物、クロロフィル a の分析を行った。

### 3. 観測結果

#### (1) 気象及び海象条件

9月12日（夏季本調査）における三河港検潮所の潮位は、9月11、12日は共に中潮であり、調査は両日とも下げ潮時に行った。一方、秋季調査（10月11、12日）においては、潮位は中潮であったが、上げ潮時に調査を実施した。

夏季調査において、本調査日の台船上では土運船到着前調査（10：10）から投入120分後調査（13：45）までの間、無風であった。調査1週間前から事前調査前日まで豊橋市内では0～5 mm の降水が観測され、事前調査日には降水は観測されなかった。本調査日には6 mm の降水が観測されたが、河川の出水等による濁りの顕著な影響や、風波による海底からの巻き上げはみられなかった。

秋季調査においては、本調査当日の台船上で北北西～西寄りの風が卓越していた。風速は3.5～5.0 m/s の範囲であった。調査5日前に豊橋市内で22 mm の降水が観測されたが、その後は事前調査日の前日まで降雨はなかった。事前調査日には2 mm の降水が観測され、本調査日には降水は観測されなかった。夏季調査と同様に、河川の出水等による濁りの顕著な影響や、風波による海底からの巻き上げと見られる現象はみられなかった。但し、土砂投入前に中層及び下層（海底上0.5 m）で濁度の上昇が見られ、土運船の係留時にスクリューの攪拌による部分的な巻き上げが生じたものと推定された。

#### (2) 密度成層と貧酸素化

図-3に、水温、塩分、DO 飽和度の鉛直分布を示す。夏季調査においては、海面下1～3 m 付近で主要な水温、塩分躍層が発達しており、1 °C/m 程度の水温勾配が存在していた。窪地内部でも緩やかな水温の勾配が観測され、周辺の海底との境界周辺の水深（水深約4 m）付近では0.2 °C/m 程度の水温勾配が見られ、弱いながらも水温成層が生じていた。調査時間中表層水は DO 飽和度が約100～130%と飽和・過飽和状態であったが、海面下3 m 付近で急激に DO の減少が確認され、海面下4 m 以深ではほぼ無酸素状態であった。

秋季調査においては、水温成層はかなり解消し、表層と底層の水温差は0.2°C～0.7°Cにすぎなかった。水位が比較的低い土砂投入直前には水深3～4 m 層に約1 ‰/m の塩分成層と緩やかな水温成層が見られたが、水位の上

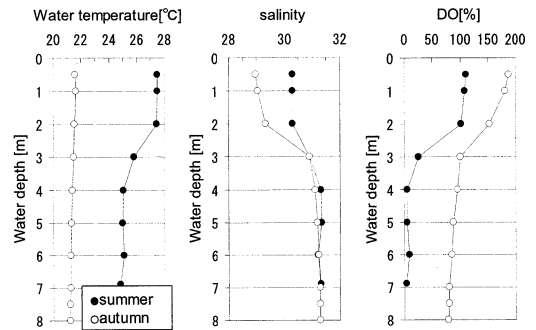


図-3 水温、塩分、DO 飽和度の鉛直分布

昇と共にその水深帯での塩分・水温成層は解消し、拡散調査中の成層は4 m 以深ではほとんど見られなかった。DO 飽和度も塩分などの分布に対応した鉛直分布をとっていたが、底層においても75%以上であり、貧酸素化は解消していた。

#### (3) 底質調査結果

夏季調査において、投入地点（St.1）における窪地内の底質は、シルト・粘土分が72.2%（うち粘土分が44.0%）と高く、細砂分は25.7%であった。また、含水率は59%、強熱減量は9.4%、有機炭素量は9.16 mg/g であり、有機質に富んだ底質であった。一方、投入土砂（三河港浚渫土砂）の底質はシルト・粘土分が58.8%、細砂分が39.2%、 $D_{50}$ は0.050mm であり、含水率は33%、強熱減量は4.7%、有機炭素量は7.19 mg/g であり、投入土砂は底質よりも細砂分が多く、有機分は少なかった。

秋季調査において、投入地点（St.1）における窪地内の底質は、シルト・粘土分が48.4%（うち粘土分が20.9%）であり、細砂分は45.8%、 $D_{50}$ は0.051mm で、夏季調査時点の底質よりは細砂分が多かった。また、含水比は184%、強熱減量は8.0%、有機炭素量は13.5mg/g であり、夏季に比較して有機炭素量の含有量は高かった。投入土砂（三河港浚渫土砂）の底質はシルト・粘土分64.0%、細砂分41.0%、含水比64%、強熱減量5.47%、有機炭素量は9.39 mg/g であり、投入土砂の方が細砂分・有機分共に少なめであった。

#### (4) 濁度の変化

夏季調査及び秋季調査における、多項目水質計による濁度観測結果を図-4に示す。海底上1.0 m の濁度は土砂投入の11時45分以前には各地点約1～10 FTU（FTU：ホルマジン1mg/l 含む溶液の濁度が1（FTU）である）前後で推移しており、水深の深い地点ほど濁度が高い傾向が見られた。11時45分の土砂投入直後の調査では、台船上の St.1 で約284 FTU、St.5 で約198 FTU、St.6 で約53 FTU の最大値を観測したが、St.2、St.3、St.4 では大きな変化は見られなかった。その後、St.2 では投入20分後調

査時に約52 FTU, St.3, St.4では投入40分後調査時にそれぞれ約46 FTU, 10 FTUの最大値を観測した。海面下4.0 mの濁度は投入20分後調査時にSt.5で約10 FTUの最大値を観測したが、それ以外では各地点とも明瞭な変化はなく、約1~5 FTUで推移した。海面下0.5 mの濁度は調査時間中、各地点とも約2~3 FTUで推移した。

秋季調査における濁度観測結果を図-4に示す。濁度は、土運船到着前の14時頃には各地点各層とも1 FTU前後であったが、15時頃の土運船到着後の調査では、St.2以南の地点において最大10 FTU程度までの増加が確認された。土砂投入開始後、全地点の海底上1.0 mで約40~200 FTUの濁度が観測された。また、St.1, St.2', St.3, St.4においては水面下4.0 mにおいても20~40 FTUの濁度が観測された。水面下0.5 mにおいては、各地点ともに土砂投入によるものと思われる明瞭な濁度の増加は観測されず、1~5 FTU程度の濁度で推移した。

#### 4. 考察

##### (1) 夏季調査時における濁り拡散状況

夏季調査時を基にしたSt.1~4における結果の概略断面図を図-5に示す。ここで、調査時間中St.1の海底上1.0

m (海面下5.1 m) のDO飽和度がおおむね60~80%であり、St.2の海底上1.0 m (海面下5.7 m) のDO飽和度がおおむね0~10%であったことから、本調査時の貧酸素水塊の躍層面は海面下5.4 m付近にあるものと推定した。図-5に示したように、11時45分に土砂が投入され、St.1の海底上1.0 mでは土運船到着前の濁度が3 FTUであったものが、投入直後では284 FTUにまで上昇した。St.1, St.2, St.4ともに上層(海面下0.5 m)、中層(海面下4.0 m)では土砂投入による濁度の変化は殆ど見られなかった。

##### (2) 秋季調査時における濁り拡散

海面下4.0 mでは土砂投入位置から北へ200 mに位置するSt.4で最も濁度の増加が見られ、約40 FTU増加した。このように、St.4の濁度増加量はSt.4と土砂投入場所の間に位置するSt.2'よりも高い値である。このことから、土砂投入によって発生した濁りは底層を拡散しながら徐々に浅い水深帯へ拡散していくことが示唆された。

##### (3) 濁りの鉛直拡散量の比較

夏季調査及び秋季調査共に、底層濁度が最大値を取った時刻における海底上1.0 mと海面下4.0 mの水温及び塩分から、それぞれの海水密度を計算した。その結果、

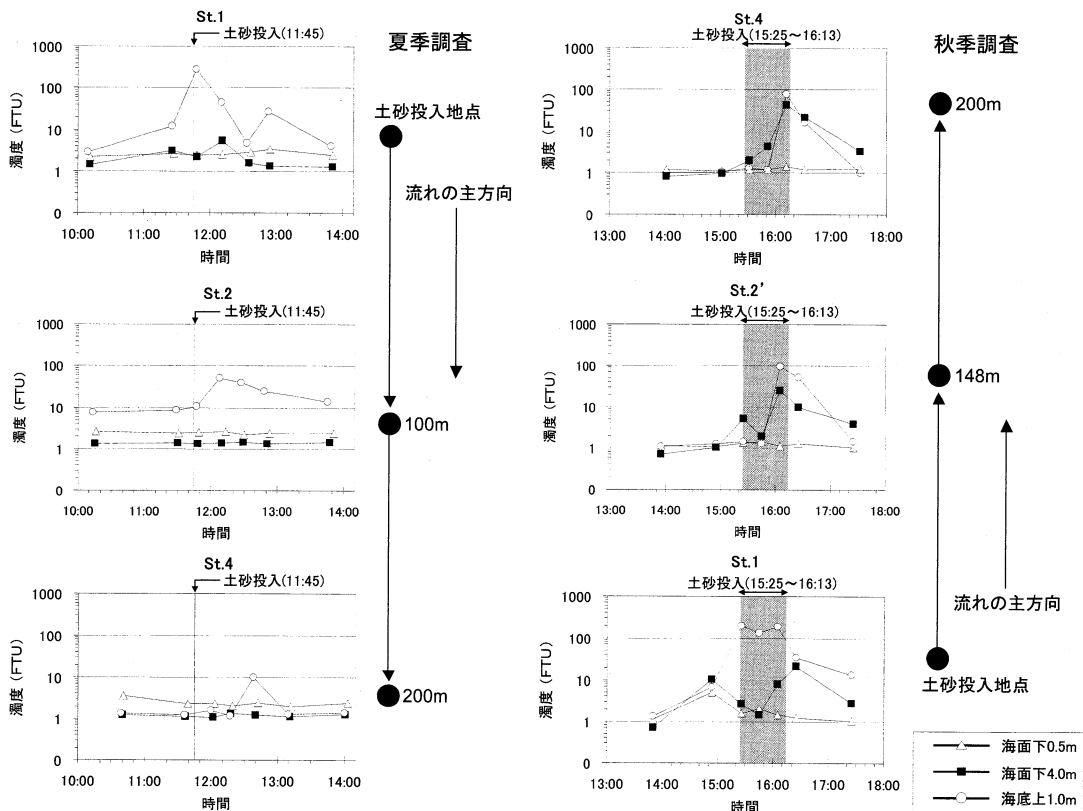
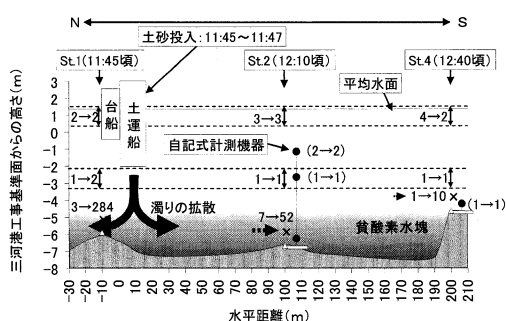


図-4 土砂投入による濁度の経時変化



※各地点の観測層横の数字(例: 3→284)は、矢印前の数値は土運船到着前の濁度、矢印後の数値は土砂投入開始後、各地点の下層(海底上1.0m)で最大濁度を観測した時の濁度を示す。ただし、多項目水質計の濁度単位はFTU、自記式計測機器(GOMPACT-CLW)の濁度(括弧付きで示した)の単位はppmである。

図-5 密度成層期における測点の断面配置と濁り拡散

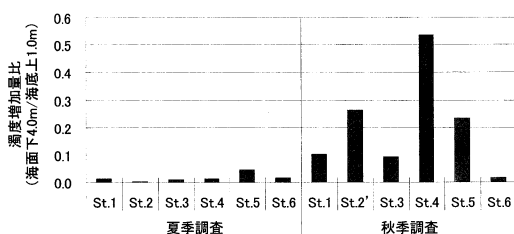


図-6 調査期・地点における濁度増加比

秋季調査においては海底上1.0 mと海面下4.0 mとの密度差は確認されなかったのに対し、夏季調査においては海底上1.0 mと海面下4.0 mとの間で約2 g/Lの密度差を持つことが確認された。

各調査期・各地点の水面下4.0 mの最大濁度増加量と海底上1.0 mの最大濁度増加量の比を図-6に示す。各調査時において土砂投入の経過時間に違いが見られたことから、濁度の絶対値の比較よりも中層と底層の観測値から濁度増加比を算出した結果を比較することにより、季節による違いを評価できる可能性があると考え、以下の解析を行った。

濁りの鉛直拡散による濁度上昇を標準化した上で各調査間の比較を行うために、中層(海底上4.0 m)の最大濁度増加量と下層(海底上1.0 m)の最大濁度増加量の比(海底上4.0 m/海底上1.0 m)を算出した。中層で観測された濁りの増加が全て下層からの鉛直拡散に由来するものであるとは限らないが、この濁度増加量比が0から1へ近づく程、中層で下層と同程度の濁りの増加が見られたということになり、濁りの鉛直拡散が活発であるということになる。逆にこの濁度増加量比が0に近づくほど、下層での濁度の増加に対して中層での濁度の増加が少な

いことを意味し、濁りの鉛直拡散が不活発であると判断できる。

夏季調査と秋季調査で濁度増加量比を比較すると、夏季調査では全ての観測点において0.04以下の小さな比を取ったのに対し、秋季調査では最大0.54という明らかに高い値になった。このことから、約2 g/Lという微少な鉛直方向の密度差が濁りの鉛直的な拡散に対して支配的な影響を与えることが見いだされた。

## 5. 結論

三河湾窪地において浚渫土砂による埋め戻し投入に伴う濁りの発生に関して、夏季及び秋季の2回、濁りの拡散特性に対する密度成層の効果を観測する調査を行った。その結果、密度成層が発達した夏季の場合には、微少な密度差が物質輸送の障壁となり、底層で発生した土砂投入後の濁りは窪地内部にほぼ留まること、一方で成層がほぼ解消した秋季には、発生した濁度は中層にも拡がること示された。この結果は、施工計画の検討にあたり一つの判断指標として活用できる可能性があるといえる。

## 謝辞

本研究は、(独法)鉄道建設・運輸施設整備支援機構の運輸分野における基礎的研究推進制度の助成により行われた。現地観測の計画、実施は、愛知県水産試験場、(株)日本海洋生物研究所の皆様にご協力をいただいた。現地観測の実施は、国土交通省中部地方整備局三河港湾事務所及び徳倉建設(株)の関係者の皆様、港湾空港技術研究所衣笠泰広氏及び高橋正一氏(現(株)オオスミ)の助力を得た。港湾空港技術研究所細川真也氏からは、貴重な意見をいただいた。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 石田基雄, 鈴木輝明(2006): 三河湾における浚渫窪地修復事例と実現に至る経過, 海洋理工学会, 12, No.2, pp.65-71.
- 大見智亮, 市川哲也, 山口将人, 酒井亨, 寺澤知彦, 田口浩一, 中田喜三郎(2006): 三河湾の浚渫窪地周辺海域における微細な物理環境解析, 海洋理工学会誌, 12, No.2, pp.83-88.
- 国土交通省(2005): 港湾行政のグリーン化 今後の港湾環境政策の基本的な方向(交通政策審議会答申), pp.49.
- 白石修章, 伊藤弘樹, 小山善明, 天水太一(2000): 関西空港における土運船等による濁りの発生量の定量把握, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.1271-1275.
- 武田和也, 石田基雄(2006): 三河湾における苦潮によるアサリ大量死と浚渫窪地内部の貧酸素化の状況, 海洋理工学会, 12, No.2, pp.65-71.
- 中村由行(2006): 東京湾における浚渫窪地の現状と問題点, 海洋理工学会平成18年度春期大会講演論文集, pp.1-4.
- 内藤了二, 中村由行, 今村均, 佐藤昌宏(2006): 浚渫跡地の修復に関する施工上の影響と研究開発課題の抽出, 海洋開発論文集, 22, pp.649-P654.
- 東山 茂(2004): 浚渫土砂の発生・処分の実態と今後の展望について, HEDORO, No.90, pp.14-16.