

工事海域の濁り監視と予測

稲垣 聡* ・山木克則* ・田中昌宏**
中込國喜***・上田純広****・松本壽人*****

海工事などで発生する濁りが外部に流出すると周辺環境に影響を与える可能性があるため、濁りを精度良く計測・予測する技術が重要である。本論では関西国際空港 2 期空港島の建設現場における土砂投入時の濁りを対象に、従来の濁度計による「点」での測定を超えて広範囲の面的な濃度や鉛直方向の分布までを得ることを狙いとし、以下の検討を行った。(1)航空写真撮影により面的な濁り分布が計測できた。(2)ADCP を用いた超音波反射強度の移動計測により水中の 3 次元的な濁り分布と高濃度の濁りの下での水深計測に成功した。(3)大阪湾全体の流れ計算と工事海域周辺の微地形・構造物を考慮した詳細計算の接続により濁り分布の高精度な解析に成功した。

1. はじめに

海工事などで、発生する濁りが工事海域外に流出すると周辺環境に影響を与える可能性があるため、濁りを精度良く計測・予測し管理する技術が不可欠である。本論では、2001 年 6 月 5～7 日に関西国際空港 2 期空港島の建設現場で実施した土運船からの土砂投入時に発生する濁りに対する現地観測を中心に、以下の 3 つの内容について記述する。

- ・航空機リモートセンシングによる濁り写真撮影
- ・ADCP による 3 次元濁度計測と水深計測
- ・濁り範囲高精度予測シミュレーション

従来の濁度計を用いた濁りの測定は、ある「点」での濃度を求めるものであるが、ここでは広範囲の面的な濃度や鉛直方向の分布までを得ることを狙いとした。

2. 航空機リモートセンシングによる濁り撮影

(1) 航空写真撮影と明度解析による変換

航空写真撮影により濁り濃度を面的に調べる方法を述べる。写真-1 は高度約 1800 m から撮影した 17 枚の航空写真を結合（デジタルモザイク処理）し、工事海域全景写真を作成、その一部を示したものである。図-1 は写真-1 の明度（コントラスト）を解析し、SS 濃度に変換したものであり、濁りの分布が明瞭に示されていることがわかる。図-1 における明度から SS 濃度の変換には、図-2 に示した船から採水したサンプル中の浮遊土砂（SS）濃度と写真の明度の関係を用いた。この際、写真の明度分布全体のうち 20～40% の範囲が濁り部分の濃淡に対応していたので、この範囲を 100 段階に分割し、その



写真-1 工事海域の濁りの航空写真

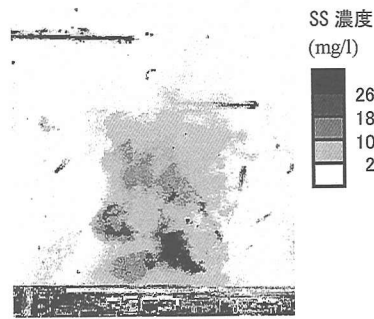


図-1 写真の明度から求めた浮遊土砂(SS)濃度

明度（段階）と SS 濃度の関係をプロットしている。

(2) 本手法の利点・問題点と考察

本手法の航空写真撮影によるメリットは、比較的低コスト（1 飛行…数十万円程度）で、撮影が飛来時刻に制限される人工衛星と違い必要ときに飛行してデータを得ることができ、さらに異なる時刻に撮影すると濁りの時間的な変化の詳しい情報が入手できることである。一方で、写真の明度は撮影時の条件（雲の量、撮影時間帯、露出など）によって変化するので、明度と SS 濃度の関係は常に一定ではない。したがって、通常の採水による濁度の調査にあわせて行う方法が効果的と考えられる。

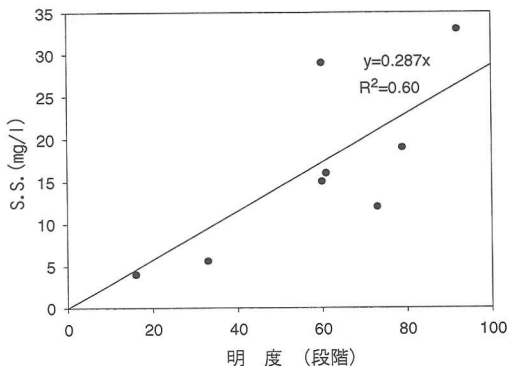


図-2 航空写真の明度と採水中の SS 濃度の関係

* 正会員 工修 鹿島建設(株)技術研究所主任研究員
** 正会員 工博 鹿島建設(株)技術研究所グループ長
*** 正会員 鹿島建設(株)関西支店部長
**** 鹿島建設(株)ITソリューション部
***** 鹿島建設(株)関西支店事務所課長

本手法で航空写真を使用するときは、太陽光の海面での反射（ハレーション）を常に考慮することが重要である。今回の明度解析の方法では濁りの箇所とハレーションを分離することができない。そのため、撮影に適した時刻は朝早くか夕方と考えられるが、今回は午前10時近くに実施した結果、17枚の写真からハレーションの写っていない部分をつなぎ合わせる必要が生じている。

なお、図-2に示した明度とSSの相関が比較的低いのは、撮影時刻のみでは採水が出来なかったことが大きい。海上の船から飛行機が視認できず、今回は撮影時刻から数分～10分程度ずれて採水したサンプル中の濁度も、整理の中に用いた。その場合、今回は9時41分と9時49分の2回の飛行による写真が得られていたので、近い時刻の写真と比較した。さらに濁りの時間による移動も考慮するため、2枚の写真から濁りの移動速度と方向を割り出し、実際の採水点から移動距離だけ離れた位置の明度を調べているが、時間の経過による濁り濃度の変化までは考慮していない。また、もともと濁りはパッチ状に存在するため、少しの場所の差による濁度の変化は大きい。以上のことから、撮影時刻に限りなく近い時間に多数のサンプルを採取することで、明度と濁り濃度の相関は上昇すると考えられる。

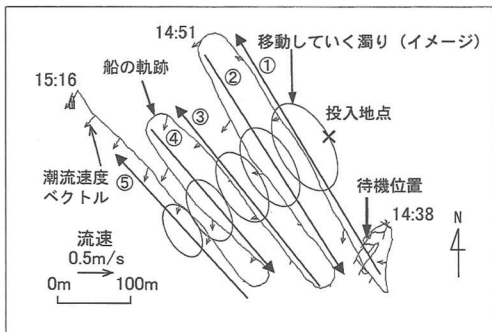


図-3 濁り計測を実施した観測船の動き

3. ADCP による濁度計測

(1) 計測方法

ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler, 超音波流速分布計) は、船の舷側などに設置して水中の流速分布を測る機器である。この ADCP で、測定時に利用する水中の浮遊土砂からの超音波反射強度を用いて自然砂の巻き上がり時などの SS 濃度を推定する方法が研究されており (川西ら, 1989; 泉宮ら, 1990; など), これを著者らの知る限り初めて工事海域の濁り計測に適用した。

図-3に観測船の動きを示す。土運船の近くで待機後、土砂の投入があり観測船のまわりに濁りが現れてから船の移動を開始し、約40分間船速約1m/sで移動した。この時間帯では南西に向けての弱い流れがあり、濁りもその方向に移動したが、船は濁りの強い部分を何度も通過するよう直進→方向転換を繰り返した。ADCPはRD Instruments社製1200kHzブロードバンド型を用いた。

(2) 計測結果と考察

図-4にはADCPの超音波反射強度とSS濃度の関係を示しており、表層・中層・底層の各水深にかかわらず相関が高いことが分かる。図-5に観測で得られた超音波反射強度の時空間変化を示す。図中には図-4の関係を用いてSS濃度に変換した値が併記してある。図-4及

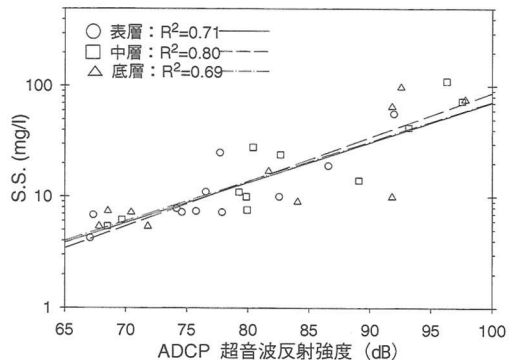


図-4 ADCPの超音波反射強度とSS濃度の比較

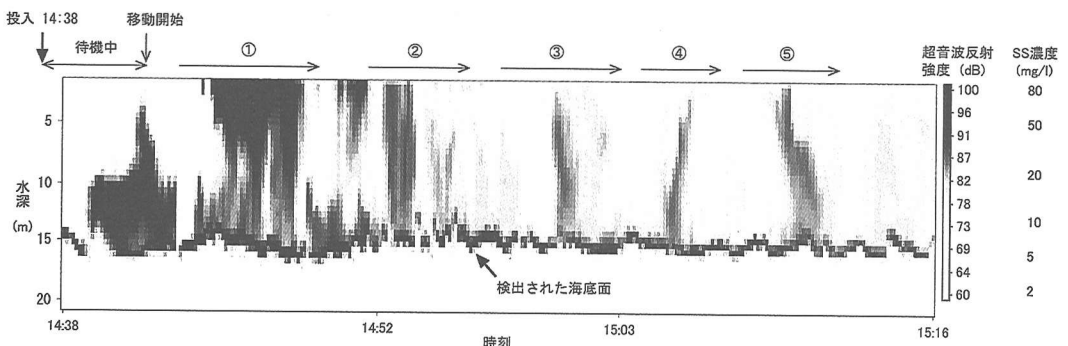


図-5 ADCPが計測した水中の濁り濃度分布 (2001年6月6日、土運船BG-201からの土砂投入による)

び図-5の超音波反射強度は、距離と濃度による反射強度の減衰を考慮し、式(1)および(2) (RD Instruments, 1994) を用いて補正して求めた。

$$I_0 = E_i \times EL + 20 \log_{10} r + 2\alpha r \dots\dots\dots (1)$$

$$E_i = 127.3 / (T + 273) \dots\dots\dots (2)$$

ここに I_0 : 補正後の反射強度 (dB), E_i : エコー強度係数, EL : ADCP で受信されるエコーレベル(count), r : ADCP のセンサー (トランスデューサー) から測定層までの距離, α : 海水による音波の吸収率, T : 水温(°C). 本研究では, $\alpha=0.55$ の値を用いた (Gordon, 1996).

図-5を詳しく見てみると、まず待機中の時間帯において、底層付近で反射強度の高い部分を感知している。これは投入された直後の土砂に含まれる高濃度の濁りが密度流を形成し、底層付近を広がった際、そのフロント部分を捉えたものと考えられる。この投入直後の底面を這う強い流れは古土井 (1989), 白石ら (2000) によっても指摘されている。次に、船が移動を開始した後、①～⑤の部分において、超音波強度の高い部分を通過している。最初に発生した強い濁りが時間とともに薄まり、消滅に向かっている様子が示されている。また、⑤の位置で顕著であるが、水表面に達している (=水面から見える) 濁りの範囲より、水底に近い方がより広い範囲に濁りが広がる様子なども知ることができる。

ただし、図-4に示されるように、本測定での超音波反射強度は薄い濁りにも敏感に反応しすぎる傾向にあり (SS 濃度が 7～10 mg/l のときに、超音波反射強度は 67～92 dB 程度の範囲にばらつく)、定量的な濁度の把握には、濁度計を併用することが望ましいと考えられる。

ADCP 観測の長所は鉛直方向の分布がわかることであり、さらに船で移動することで、短時間に3次元的な濁りの分布が計測できる。流速の測定結果とあわせれば濁り物質の輸送量 (フラックス) までを計算することができ、より詳細な濁度管理が可能になると考えられる。

4. ADCP による測深

今回用いた ADCP は Bottom-track の機能により測定時に水深を計測することから測深器としての役目も果たす。本建設現場では土砂投入後の出来形の測量にマルチファン・ビームによる測定が行われている。現状の機器は濁りの存在で測定が制限され、土砂投入時に発生する濁りの収まりを待って測量が行われている。一方、今回の計測で図-5のように ADCP は土砂投入直後の高濃度の濁りの下でも海底面を検知し、測深が出来ている。何回かの同様の観測により、土砂投入直後に水中に泡が発生する場所での数分間を除き、ADCP で測深ができることが分かった。

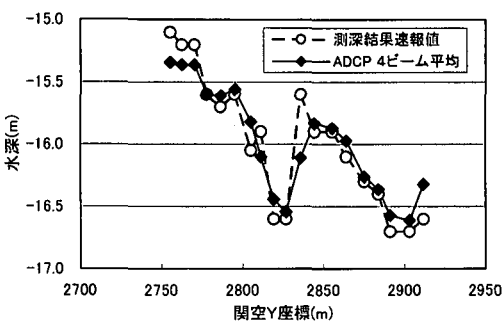


図-6 マルチファンビーム測量による水深速報値と ADCP の測深値の比較 (速報値は水平 5 m メッシュ上に編集されたデータを使用)

図-6は2001年6月6日のマルチファンビーム測深結果 (土砂投入数時間後に計測) と ADCP による測深値 (投入 8 分後に計測) の比較例であり、ADCP 測深は出来形管理に十分な精度 (約 10 cm) を有している。

5. 濁り範囲予測シミュレーション

(1) シミュレーションの目的

濁り分布の「予測」を行うためには数値シミュレーションの手法が不可欠となる。関西国際空港の2期空港島建設工事においては、細田ら (1999), 白石ら (2000) に紹介される「水質監視支援システム」により、潮流・吹送流までを考慮した濁り粒子の輸送・沈降過程の予測計算が行われている。このシステムは日々の濁り発生簡易的・迅速な予測を目的として開発されたものである。

本研究では、より詳細な時々刻々の濁りの予測を可能にするため、大阪湾全体の計算を見直すとともに、工事

表-1 計算条件一覧

項 目		内 容
大阪湾全体計算	計算領域	図-7に示す範囲
	計算期間	2001年5月8日～6月8日
	水平解像度	1 km
	鉛直層分割	5 層
	境界条件	潮汐 主要 4 分潮
		塩分 32 一定
		水温 表層 23°C・底層 18°C, 線型補間
	河川流入 (淀川)	流量 570 m³/s, 塩分 20, 水温 25°C
	風	開空 MT 局の時系列 (10 分毎)
	水平拡散係数	50 m²/s
詳細流動・濁り拡散計算	計算時刻間	5 分
	計算領域	図-9に示す範囲
	計算期間	2001年6月6日～7日
	鉛直層分割	5 層
	境界条件	水位・塩分のネスティングによる
	風	開空 MT 局の時系列 (10 分毎)
	計算時刻間	1 分
	水平拡散係数	流れ 1 m²/s, 物質拡散 0.01 m²/s
	沈降速度	5.79×10 ⁻⁴ m/s
	濁り発生原単位	4.6×10 ⁻³ ton/m³ (9.8 kN/m³)
	濁り発生位置・時刻	土運船の土砂投入位置・時刻

海域の計算の解像度を上げ、海底地形や汚濁防止膜などの構造物を可能な限り取り入れた上で、現地の流れと濁りの移動・拡散の高精度の計算を試みた。

計算モデルにはオランダ・デルフト水理研究所との共同研究による DELFT3D・鹿島モデル (Delft Hydraulics, 1999) を用いている。

(2) 大阪湾全体の流動計算

潮汐、風、密度変化 (塩分濃度及び水温) を考慮し、まず大阪湾全体の流動を計算した。計算条件を表-1 に示す。境界条件などは中辻 (1994) のデータを参考に与えている。図-7 に上げ潮時の大阪湾内の流れの計算例を示す。大阪湾の潮流は友ヶ島水道・明石海峡の2つの水道から出入し、関西国際空港 (以下関空) 周辺では、基本的に下げ潮時に南西への流れ、上げ潮時に明石海峡に向かう北～北西への流れとなる。

中辻ら (1994) の研究に示されるように、大阪湾の流れは潮流と、淀川を中心とする河川流入による密度のバランスも重要である。関空周辺は大阪湾東岸に沿って南下してくる淀川からの淡水の影響を受ける場所であるため、まず淀川の流量の大小による流況の変化を検討した。この結果、日潮不等の小さいときの上げ潮時では、図-8 に示すように北流時の流れの向きが淀川の流量により変化することがわかった。このことから、最終的には関空周辺の流れを求めるためであっても、潮汐・風に加えて特に淀川からの淡水流入による密度の影響が重要であり、大阪湾全体の流動から計算を実施するとともに淀川の流量を正確に与える必要があることがわかる。

(3) 工事海域周辺の詳細流動計算

次に、大阪湾全体の計算結果を工事海域周辺を 50 m の計算格子で分割した小領域 (図-9) の境界条件にネスティングし、工事海域の時々刻々の流れを詳細に求めた。工事海域の外周には図-10 のように汚濁防止膜として海底から高さが 7 m の自立型のものとその 50 m 外側に丈が 5 m の垂下型のものが配置されている。現地の水深は約 20 m で、今回の計算では鉛直方向を 5 層に等分割しているため、自立型・垂下型それぞれの長さにはほぼ対応するメッシュを不透過とし、汚濁防止膜の 3 次元的な効果を考慮した (田中ら, 1999)。この手法はデルフト水理研究所との共同研究の一環として、DELFT3D に新たに組み込んだ機能である。また、工事の進捗による各場所の地盤高 (水深) を考慮するため、計算日の近い時点のデータを各メッシュに忠実に与えた (図-11)。

図-12 にはそのように計算した工事海域の流れの計算結果の一例を示す。計算条件は表-1 にあわせて示している。汚濁防止膜の切れ目の部分で流れが速くなる様子や、内側の水深が浅い区域で流れが加速している様子など、現地流況の細かい特徴までを見ることができる。

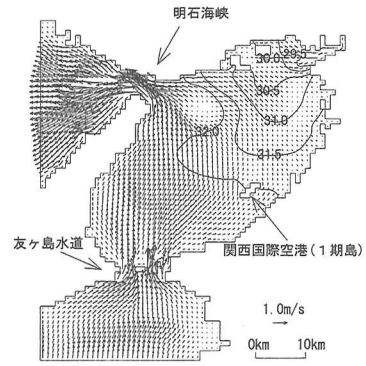


図-7 大阪湾の上げ潮時の流れと塩分濃度分布の例

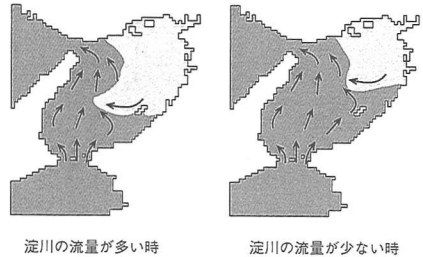


図-8 淀川の流量の変化による工事海域付近の上げ潮時の流れの変化



図-9 工事海域周辺の詳細計算範囲

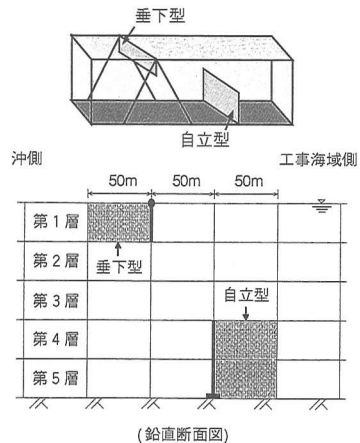


図-10 垂下型と自立型の汚濁防止のモデル化

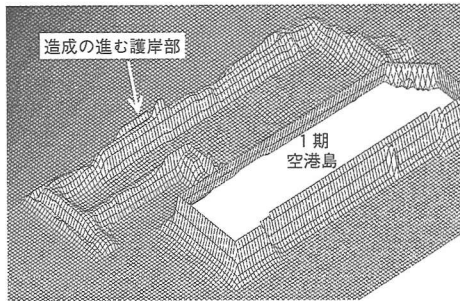


図-11 詳細計算範囲の格子分割と海底地形の設定 (地形は2001年3月末のデータを使用)

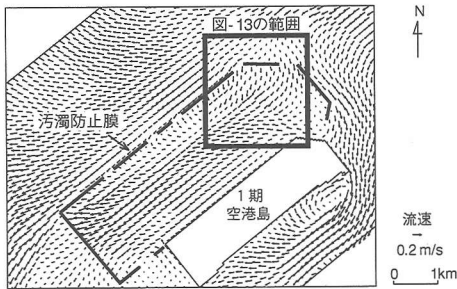


図-12 工事海域周辺の流れ計算例 (表層)

(4) 濁り拡散のシミュレーション

上記の流れの時空間分布を用い、土運船から発生した濁り分布を計算する。図-13は、ある工事日の1時間毎の濁り分布の変化を示したものである。各土運船の土砂投入時刻と投入位置を入力し、そこからの濁りの移動と沈降・拡散による濁り消散の様子を求めている。なお、濁りの発生原単位については白石ら(2000)の値を用い、沈降速度については濁りサンプルの粒度分析により30 μm の粒径にピークが見られたため、その粒径に対する沈降速度をstokesの式により求めている。図-13の最終9時50分の濁り分布計算結果と、2.で扱った同時刻に撮影した航空写真による濁り分布を比較したところ、良好な一致が得られた。

これらの濁り分布の時々刻々の変化は、アニメーションとして見るができるよう整備を行っている。

6. 結 論

本研究の主要な結論は以下のとおりである。

- (1) 航空写真撮影により面的な濁り分布が計測できた。
- (2) ADCPを用いた移動計測により、超音波反射強度による水中の3次元的な濁り分布計測と高濃度の濁りの下での水深計測に成功した。

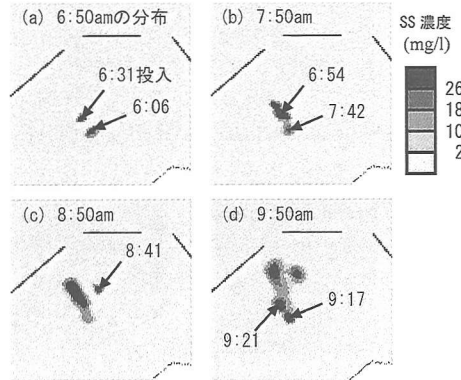


図-13 濁り分布の時間変化計算例 (表層) 矢印は土砂投入位置と時刻を示す

- (3) 大阪湾全体の流れ計算と工事海域周辺の微地形・構造物を考慮した詳細計算の接続により工事海域の濁り分布の高精度な解析に成功した。

謝辞: 本研究における現地観測実施と計算のためのデータの開示において、関西国際空港株式会社建設事務所殿に多大な協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 泉宮尊司・國田知基・泉 正寿・永松 宏・石川邦彦 (1999): 船体取付型 ADCP によるシルトおよび微細砂の濃度の時空間変動の現地観測, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 576-580.
- 川西 澄・内田卓志・松山幸彦・余越正一郎 (1998): 浅海域における ADCP を用いた濁度分布の観測, 沿岸海洋研究, 第 35 巻, 第 2 号, pp. 203-209.
- 白石修章・伊藤弘樹・小山善明・雨水太一 (2000): 関西国際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.
- 田中昌宏・van Kester, J.・池谷 毅・滝本邦彦 (1999): 大規模海洋構造物の影響評価モデルの開発, 海洋開発論文集, 第 15 巻, pp. 113-118.
- 中辻啓二・末吉寿明・山根伸之・藤原建紀 (1994): 三次元粒子追跡による流動構造の解明, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 326-330.
- 古土井光昭 (1989): 港湾工事における濁りの挙動に関する研究, 大阪大学工学部学位論文, pp. 37-80.
- 細田昌広・大下和夫・長峰弘和・宮地匠人・酒井康彦・養父恒夫・伊藤弘樹 (1999): 空港建設工事に伴う濁り拡散予測と簡易予測モデルについて, 関西国際空港開港 5 周年記念国際シンポジウム関連ワークショップ, pp. 3-1-3-5.
- Delft Hydraulics (1999): DELFT3D-FLOW, A simulation program for hydrodynamic flows and transport in 2 and 3 dimensions; release 3.05.
- Gordon, R. L. (1996): Acoustic Doppler Current Profilers—Principles of Operation: A Practical Primer, Second Edition for Broadband ADCPs, RD Instruments, p. 30.
- RD Instruments (1994): TRANSECT user's manual (BB), change 5, RD Instruments, p. 5-6.