

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

白石修章*・伊藤弘樹**・小山善明***・天水太一***

1. はじめに

関西国際空港の2期空港島建設工事は、1999年7月14日に工事区域を示す灯標が設置され、続いて、7月20日より地盤改良工に着手されることにより開始された。同年12月16日からは、底開式土運船による山砂の投入(以下、直投と略す)が始められている。

人工島の建設に係る濁りの発生と周辺海域への影響の軽減については、関西国際空港の1期空港島建設に関する調査の段階で、建設予定海域において古土井(1989)は、土運船を用いて土砂の直投試験を行い、土運船による濁りの拡散機構について以下のとおり報告している。

- ①直投直後に底面をほう強い流動が形成される。
- ②底層をほう強い流動により、濁りが数分間で数百mの範囲に輸送される。
- ③この誘起流動の成因は、土砂粒子群の落下挙動にある。
- ④投下土砂の大半は、底面衝突直後に投下点近傍に沈降、堆積する。
- ⑤比較的沈降速度の小さい粒子のみが誘起流動とともに濁りとなって拡散する。

また、堀江(1987)は、大規模埋立工事に伴う濁りによる周辺海域への影響の軽減を目的とした、濁り監視システムの必要性を論じるとともに、予測モデルの適用について以下のとおり検討している。

- ①発生した濁りの分布・拡散は、海域の流れの影響を強く受けるが適当な時間・空間平均を取ることによって定量的な扱いができる。
- ②工事に伴う濁りの問題は、取り扱い土砂の粒度、施工量、流れの大きさ、地形、海底土の特性、施工方法等と深い関わりがある。
- ③濁り監視の観点から予測モデルに求められる条件は、濁り予測の簡便性、計算の迅速性、適用条件の広範性(多くの条件を取込める)、予測精度の高さである。
- ④監視システムへ適用するシミュレーションモデルには監視システムに要求される重要な条件である広範性が

ら考えると、三次元数値モデルが有効である。

⑤三次元数値モデルの使用に対する課題は、流れ・濁りに関する先行計算と、出力データのファイリングによる計算の迅速化、予測値と実測値との照合によるパラメータの修正、モデル改良による精度の向上化である。また、現地調査のデータが少ないことを挙げており、精度向上に向け実測値の蓄積の必要性を報告している。

現在、関西国際空港株式会社では、工事中の濁り監視を目的として、古土井(1989)、堀江(1987)に従い「水質監視支援システム」が構築され、運用されている。水質監視支援システムは、鉛直方向を4層に分け、潮流(4分潮)、吹送流(4方位)を考慮した、粒子の沈降過程が再現できる粒子追跡モデルとなっている。

水質監視支援システムの中で、濁りの負荷量の計算にあたって、「濁りの発生原単位」がパラメータとして与えている。濁りの発生原単位とは、SSを指標として油谷ら(1993)により開発・検討されてきたもので、濁り成分の単位体積当たりの発生重量であり、単位は ton/m^3 (9.8 kN/m^3)等で表わされる。

水質監視システムでは、この発生原単位を、過去の知見をもとに設定されている。

そこで、実測値より発生原単位を算出することを目的として、工事中における土運船による直投によって発生した濁りを把握する調査を実施し、濁りの発生量の定量把握を試みた。

2. 調査の概要

(1) 現地調査の概要

関西国際空港は、大阪湾の南東部の沿岸から約5kmに位置し、周辺の潮流は、北東～南西の潮汐流が卓越し、南西方向への流速が強い傾向を示す。

実海域で発生した濁りは、直投された瞬間から海域の潮流による影響を受ける。このため、濁り拡散の挙動は、調査設定時の潮流により異なる結果となる。

そこで、大潮、中潮、小潮に各1回調査を設定し、濁度の測定とSSの分析試験を行った。なお、調査は、実際の工事施工中に行われたため、調査日により施工条件に違いがあり、他の工事による濁りの影響がほとんどみら

* 正会員 関西国際空港(株)建設事務所 次長
** 関西国際空港(株)建設事務所
*** (株)シャトー海洋調査

れなかった，測定ケースを抽出し検討を加えた。

また，土運船の直投とは別に，大型貨物船(40,000~60,000 ton 級貨物船)の工事区域への入出域時において，減速，旋回時のスクリューによって海底土の巻き上がりが生じ場合がある。この濁りの状況を把握することを目的として，濁度等の測定を実施した。

(2) 調査方法

濁りの測定は図-1 に示す範囲内で実施した。また，調査測点の配置は，図-2 に示すように調査日の土運船の施工位置，潮流の状況から決定した。

Case 1：大潮の下げ潮（南西流）最強時前後
1999年12月24日 13：40~15：10

Case 2：中潮の下げ潮（南西流）最強時前後
2000年2月3日 13：15~15：05

濁りの測定には透過型濁度計 (YPC-1 型 環境計測システム株式会社製) を用いて，海面下1m~海底面上1m までを1m 毎に濁度を測定した。濁度は，別途現地で採集した試水のSS 分析試験結果との相関を取り，その回帰式よりSS へ換算した。また，直投位置の上流側にバックグランド点 (以下，BG 点と略す) を設定し，実測値からBG 値を差し引いて，直投によって負荷された濁りとし，濁りの発生負荷量とした。

堀江 (1987) によれば，直投後90分 で中・下層の一部を除き濁りは識別できなくなると報告しており，測定頻度は，土砂投入前，土砂の投入直後から投入後90分まで10分間隔で測定した。

濁りの発生負荷量は，直投位置の下流側200m に主流向に直交する断面を設定し，断面上の濁りの範囲と10分毎の通過フラックスの積の総和とした。

同時に，ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler：Workhorse RD インストロメント社製) により，現地の流向・流速を測定した。

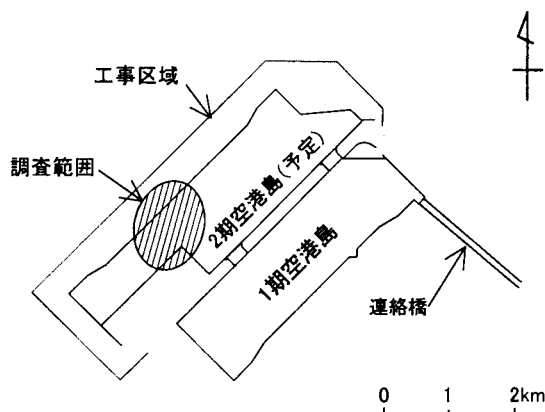


図-1 調査対象範囲

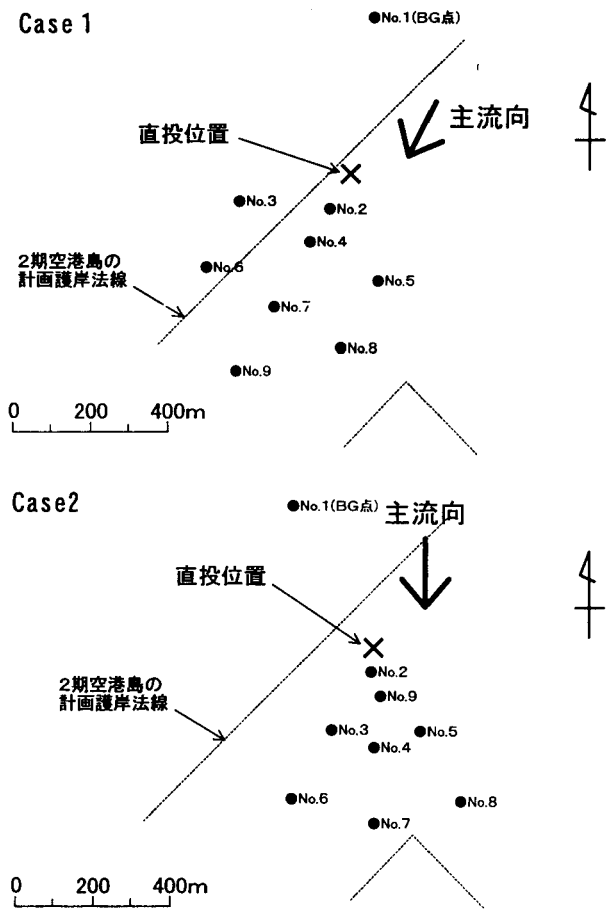


図-2 土砂投入位置と調査船の配置

3. 調査結果

(1) 直投時の諸元

調査対象とした土運船の諸元は，表-1 に示すとおりであり，直投された土砂は，シルト分以下の粒径加積百分率が6~19%の範囲の山砂であった。

調査時の工事区域内の流向・流速は，図-3 に示すとおり，Case 1 では15~25 cm/s，Case 2 では15~20 cm/s であった。ともに南西方向への流れであった。

BG 点の濁りは，SS で約2~4 mg/l の範囲であり，底層ほど若干高い傾向がみられた。

(2) 濁りの分布状況

濁りの分布状況については，Case 1 と2ともよく似た傾向を示したため，以降の図にはCase 1の結果を示した。

表-1 土砂投入時の土運船の諸元

調査日 (船名)	投入量 (m³)	土砂産地	土砂投入開始時間	土砂投入所要時間	粒度組成 シルト分の比率
Case 1 (神-8001) 1999年12月24日	2,552	洲 本	13:41	20秒	19.3%
	1,701		13:46	15秒	
Case 2 (摂津17号) 2000年2月3日	2,344	津 名	13:12	21秒	6.7%

直投位置から約200mの測点におけるSSのイソプレットを図-4に示した。図-4に示すように、SS高濃度の濁りは、海底から約5mの範囲に分布し、表層、中層

のSSの上昇はわずかであった。本調査におけSSのピークは、直投直後から20分間に測定され、30分後以降のSSは徐々に減衰していった。

次に、下層付近(水深15~19mの平均)のSSの平面分布を図-5に示した。

図-5には、水質監視支援システムの濁りの拡散予測結果も併記した。実測結果をみると直投により発生したSSは、直投直後から30分後までの間で30mg/l以上の分布域がみられたが、60分後では最大10mg/l程度、80分後では10mg/l以上の分布域は消滅した。

濁りの到達距離は、Case 1で大きく土砂投入後30分で約400m、80分後には約800mに達した。

古土井(1989)は、直投による主な濁りは下層に集中すること、その原因が、投入直後に土粒子の落下現象と付随して発生する乱泥流によるものとしている。また、直投による濁りの拡散は、まず、海底付近に高濃度の濁りが広がり、その後、潮流によって下流方向へ第2次に拡散し、100分程度で顕著な濁りはみられなくなると報告している。

(3) 濁りの負荷量と発生原単位

濁りの発生負荷量は、先に述べたように直投位置より約200mの測点を通る断面と10分間の断面の通過フラックスとの積の総和とし、式(1)より算出した。

$$W = \sum \{ (a_i \times f_i) + (a_{i+1} \times f_{i+1}) \} / 2 \times V_i \times (t_{i+1} - t_i) \dots \dots \dots (1)$$

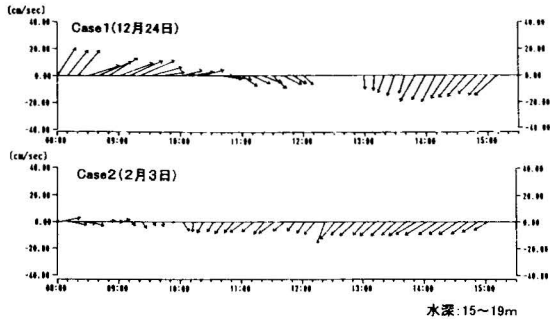


図-3 調査時の底層の流況

測点4	水深(m)	13:00	13:45	13:55	14:05	14:15	14:25	14:35	14:45	14:55	15:05	15:15	
D.L.±0.95m	底投後	10分	20分	30分	40分	50分	60分	70分	80分	90分			
0													
1		0.5	1.0	0.7	1.6	0.6	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	
2		0.5	1.0	0.8	1.9	0.6	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3	
3		0.4	1.0	0.7	2.2	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3	
4		0.4	0.8	0.7	2.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3	
5		0.5	0.7	0.7	2.3	0.6	0.5	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	
6		0.4	0.7	0.5	3.8	0.5	0.5	0.4	0.3	0.4	0.3	0.2	
7		0.3	0.7	0.5	3.1	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.2	
8		0.3	0.9	0.5	2.9	0.6	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	
9		0.3	0.8	0.5	3.0	0.5	0.4	0.3	0.3	0.4	0.3	0.2	
10		0.1	0.9	0.4	2.8	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	
11		0.0	0.8	0.5	3.3	0.5	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	
12		0.0	0.9	0.6	3.1	1.7	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	
13		0.0	0.9	0.7	3.2	0.6	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	
14		0.0	0.8	0.5	3.4	0.0	0.2	0.3	0.3	0.5	0.3	0.2	
15		0.1	0.7	0.5	3.0	0.4	0.4	0.2	0.5	1.7	0.3	0.3	
16		0.0	0.5		12.1	0.4	2.0	0.4	3.0	3.3	1.5	0.4	
17		0.0	0.2		16.7	19.3	12.2	7.1	8.1	8.9	4.6	0.7	
18		0.0	0.6		25.7	24.9	15.1	11.6	12.7	13.2	4.2	1.3	
19		0.0	0.4		28.1	21.5	25.2	20.1	12.0	12.2	15.1	8.0	2.8

図-4 SSのイソプレット図

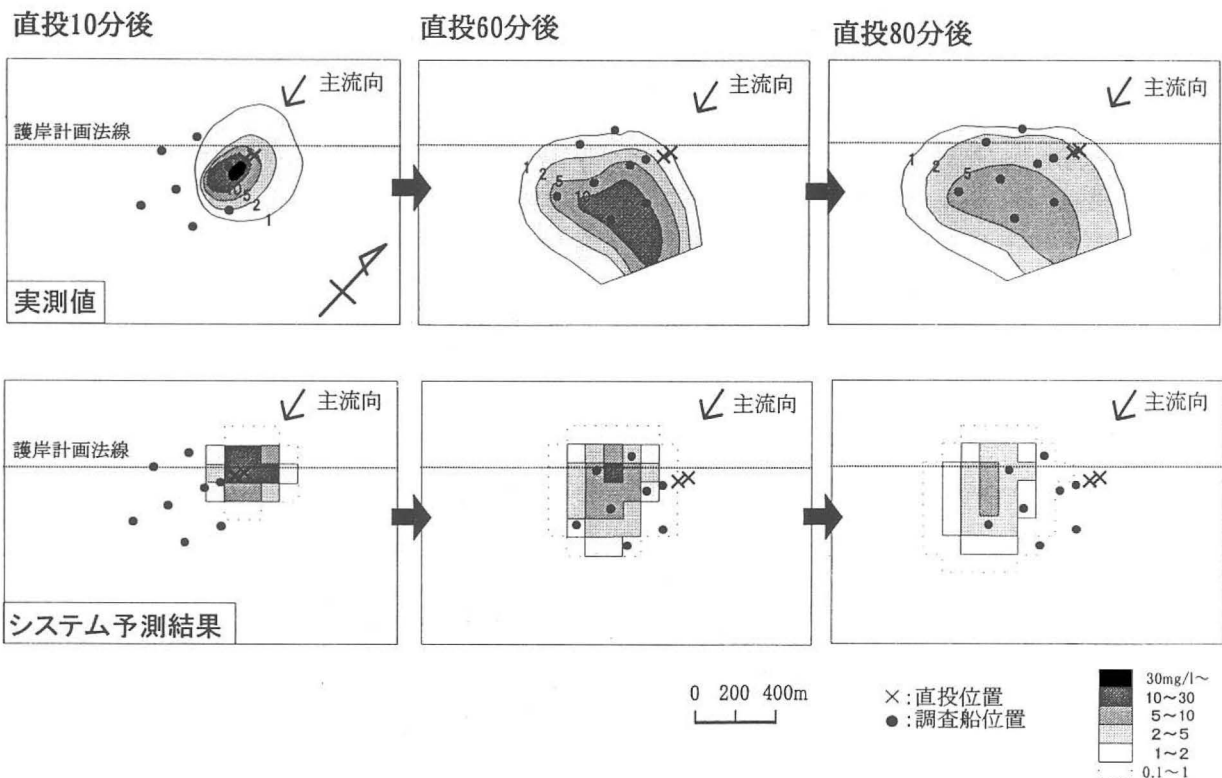


図-5 予測結果との拡散状況の比較 (Case 1: 水深15~19m)

- W:濁りの発生負荷量 (kg)
- a_i :時刻 t_i における濁り断面積 (m²)
- f_i :時刻 t_i における通過フラックス (kg/m²)
- V_i :時刻 t_i における流速 (cm/s)

直投時には投入による土砂の濁りとは別に、土砂の海底衝突時の底泥の巻上げによる濁りも発生するとされるが、2期工事ではあらかじめ地盤改良工と敷砂工(海砂)が施工され、海底泥からの巻上げは極力抑えられたものとなっている。

濁りの発生負荷量の算出結果は、表-2に示すとおり、Case 1, 2以外の結果も含め、直投による濁りの発生負荷量は26~40 ton (9.8 kN)の範囲で、発生原単位は3.23~5.70×10⁻³ton/m³ (9.8 kN/m³)、平均4.6×10⁻³ton/m³ (9.8 kN/m³)であった。

濁りの発生原単位は、発生負荷量を土砂投入量で除した値で表わされる。油谷ら(1993)は、濁りの発生・拡散が現地の流速によって変化することに注目し、沈殿池の設計で用いられる洗掘・再浮上の限界流速の考え方を適用した。投入した土砂から発生した濁りは、全土砂投入量のうち現地流速によって巻き上がる可能性がある粒径以下の粒子によるものとし、土砂投入量とその粒径以下の加積百分率から負荷量を算出している。また、工事の施工方法毎および対象海域毎に補正を行っている。また、再浮遊限界流速の粒子径は、Ingersol式-Camp式、さらに単体の粒子の沈降速度を算出するStokes式を用いて算出している。

これによると、74 μm以下の粒子径を持つ土粒子に対してはIngersol式を、74 μm以下の粒子径を持つ土粒子に対してはCamp式(松田・岩田の実験をもとに修正)を用いて、海底の土砂が舞い上がり、拡散する限界の流速を再浮遊限界流速と定義している。式(2)、(3)の境界となる流速は、約6.3 cm/sであった。

- Ingersol式 (74 μm以下の粒子に適用)

$$V_c = 1/1.2 \times V \times 8f \dots\dots\dots(2)$$
 - V_c :再浮遊限界流速 (cm/s)
 - V :沈降速度 (cm/s)
 - Stokes式より算出
 - f :摩擦抵抗係数 (=0.025)

表-2 濁り発生負荷量と発生原単位の算出用係数

	土砂投入量 (m ³)	発生負荷量 (×10 ⁻³ ton) (9.8 kN)	濁りの発生原単位 (×10 ⁻³ ton/m ³) (9.8 kN/m ³)
Case 1	4,253	40,183	5.70
Case 2	2,344	26,105	4.65
他 Case*	6,528~8,793	38,373~49,845	1.99~3.23

- Camp式 (松田・岩田の実験をもとに修正) (75 μm以上の粒子に適用)

$$V_c = 1.86 \times (\rho_s - \rho) / \rho \times gd \dots\dots\dots(3)$$
 - g :重力加速度 (980 cm/s²)
 - ρ_s :土粒子の密度 (土砂データより約2.65 g/cm³)
 - ρ :水の単位体積重量 (1.024 g/cm³)
 - d :土粒子の直径

(4) システムの設定値との比較

調査時の流速は、約20 cm/sであり、式(3)を用いて浮遊限界粒子径を求め、表-3に示した。表-3には発生原単位の算出に用いるパラメータと既存の水質監視支援システムパラメータの設定値も併記した。

本調査海域の濁りの発生原単位は、式(4)より算出した。

- $$w_0 = (R_{74}/R) \times (W/Q_s) \dots\dots\dots(4)$$
- w_0 :発生原単位
 - R :現地流速における再浮遊限界粒子の粒径加積百分率 (%)
 - R_{74} :投入土砂の74 μm以下の粒子の粒径加積百分率 (%)
 - W :負荷量 (SS発生量)
 - Q_s :投入土砂体積

表-3をみると、システムの設定では、現地の流速は泉州沖の平均流速として20 cm/sを採用し、流速20 cm/sの再浮遊限界粒子径である742 μm以下の粒子を濁りの負荷源と設定している。本調査時の工事区域内の流速は、ほぼ10~30 cm/sの範囲にあり、設定値と同等に比較できるものと考えた。

設定値の直投による濁りの発生原単位は、三建神戸調査設計事務所(1975)神戸港での実験結果の9.9, 13.0×10⁻³ton/m³ (9.8 kN/m³)と、古土井(1989)の報告した3.09, 4.98×10⁻³ton/m³ (9.8 kN/m³)の平均値を用いている。

本調査結果の発生原単位は、システムの設定値と比較すると、濁りの発生原単位は幾分小さい値となったが、古土井(1989)の報告した3.09, 4.98×10⁻³ton/m³ (9.8 kN/m³)と比較すると大差ない値であった。

表-3 濁り発生原単位の算出用係数

	Q_s (m ³)	W (×10 ⁻³ ton)	平均流速 (cm/s)	再浮遊限界粒子径 (mm)	R (%)	R_{74} (%)	w_0 (kg/m ³)
設定値*			20.0	0.742	32.0	13.7	7.7
Case 1	4,253	40,183	20.0	0.742	31.0	19.3	5.70
Case 2	2,344	26,105	18.7	0.650	16.0	6.7	4.65

*設定値の発生原単位は、式(4)から算出したものではない。

表-4 既定値の変更に伴う予測結果平面図の負荷量の変化

	実測による 負荷量 ($\times 10^{-3}$ ton)	変更前の 判読負荷量* ($\times 10^{-3}$ ton)	変更後の 判読負荷量* ($\times 10^{-3}$ ton)	変更前/ 変更後 (%)
Case 1	40,183	21,396	26,543	124
Case 2	26,105	11,873	14,994	126

*予測結果の負荷量は、計算させた時間帯のある時刻の負荷量のうち

また、現場流速による再浮遊限界粒子径以下の可積百分率に含まれるシルト分以下の可積百分率の比は、やや高い値であった。

実測値から求めた発生原単位等を、当該海域の値として水質監視支援システムのパラメータに取り込み、計算結果と実測値を表-4に示した。濁りの発生負荷量は、設定値の変更後の値が120%程度増加し、実測による濁りの発生負荷量に近づく結果が得られた。

(5) 大型貨物船の航行時の濁りの発生状況

調査位置は、空港等の南部工事区域外の海域のうち、大型貨物船の減速・旋回が想定される位置において、大型貨物船の通過点、潮流の下流側100mと300mの3点を設定した。調査時の大型貨物船の諸元を表-5に示した。

調査は、大型貨物船の入域時について実施したが、出域時には、濁りの発生がなかったため、入域時の測定結果を表-6に示した。

大型船貨物船のスクリューによって巻き上がった濁りは、最大幅250m、延長約1,400mであった。また、最大濁度は、通過点と通過点から100m下流で7度であり、ほとんど影響がみられなかった。通過点から300m下流では、各層を通じて1度であり、大型貨物船の航行による濁りはみられなかった。その後、濁りは、大型貨物船の通過点および100m下流の地点でも1時間程度で1度となった。

4. 結 論

関西国際空港では、2期空港島の護岸築造埋立工事が開始され、また、濁り監視を目的とした水質監視支援システムが運用されている。このシステムのパラメータである濁りの発生原単位を実測より算出することを目的として、底開式土運船による直投後の濁りの拡散状況を把握する調査を実施した。

表-5 大型貨物船の諸元

入 域 日	船 名	トン数	積載物	満載喫水
1999年12月3日	シエロルシア	69,950ton	海砂 45,000m ³	13.23m

表-6 大型貨物船の入域による濁りの発生状況 (100m地点)

	地点1 11:50	地点2 12:00	地点3 12:12	地点4 12:22	地点5 12:45	地点6 12:51	地点4 13:28
表 層	5	5	3	7	5	4	1
中 層	1	3	5	6	2	1	1
下 層	1	2	2	2	1	2	1
最大範囲	幅: 250m			延長: 1,400m			

*工事区域へ接近に伴わない航行速度は、約2 nt程度で、地点4と地点5の間でエンジンを停止し、タグボートの支援を受けて入域した。

実測値から算出された濁りの発生負荷量は、約26~40 ton (9.8 kN/m^3)であった。また、算出された発生原単位は、 $3.2\sim 5.7 \times 10^{-3} \text{ ton/m}^3$ (9.8 kN/m^3)の範囲であり、平均値を取り $4.6 \times 10^{-3} \text{ ton/m}^3$ (9.8 kN/m^3)とした。

実測より得られた値をシステムの設定値と比較すると、発生原単位は小さめとなった。

水質監視支援システムの設定値に実測値を採用した結果は、濁りの発生負荷量が120%程度増加となり、実測値の濁りの発生負荷量に近づく結果が得られた。

大型貨物船の入域時にスクリューによって巻き上げられた海底土の濁りは、通過点と100m下流の地点で最大7度であり、ほとんど影響はみられなかった。また、その影響範囲についても通過点から潮流の下流側300m以内であった。なお、通過点および100m下流の地点で確認された濁りも1時間後には解消していた。

参 考 文 献

運輸省第三港湾建設局神戸調査設計事務所 (1975): 土砂による海水汚濁の予測方法 手法開発のための調査研究 (通年報告書), pp. 382-452.
 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.
 堀江 毅 (1987): 海上工事に伴う濁り予測モデルと濁り監視への適用性について, 港湾技術研究所報告, Vol. 26, No. 2(1), pp. 253-295.
 油谷進介・室田 明・岩田尚生 (1993): 浚渫埋立工事における発生原単位の検討, 土木学会論文集, No. 474, IV-20, pp. 67-74.