

大阪湾における底質の移動に関する現地観測について

宮本 六男*・福手 勤**・笹島 隆彦***
川瀬 洋****・小松 憲三*****

1. ま え が き

近年、閉鎖性内湾・内海における富栄養化、有機汚濁の進行が問題となり、運輸省では閉鎖性内湾の水質・底質等の海洋環境を改善するために底質浄化事業の実施について検討している。なかでも、第三港湾建設局では大阪湾の海底に堆積している汚泥を浚渫・除去することによる底質浄化効果について種々の調査を実施してきた。その結果、汚泥を浚渫・除去した場合に、浚渫直後には底質浄化効果が認められるが、「新生堆積物および周辺海域からの汚泥の流入」によって浄化効果の持続性が損なわれることが判明している。効果を長期間持続させる対策を考える場合、まず海底に堆積した汚泥の移動機構を把握することが必要である。

本報告は、未解明であった微粒子の底質の移動機構（特に、底質の浮遊現象）を明らかにする目的で高波浪時に実施した現地観測の結果を報告するものである。

2. 現地観測

現地観測は、神戸港沖合約5 km（図—1、水深約 18 m）にある神戸港波浪観測塔（図—2）の周辺において昭和 60 年 8 月～昭和 61 年 2 月の約 7 か月のうち高波浪時を選んで 4～5 日の連続観測を計 5 回実施した。

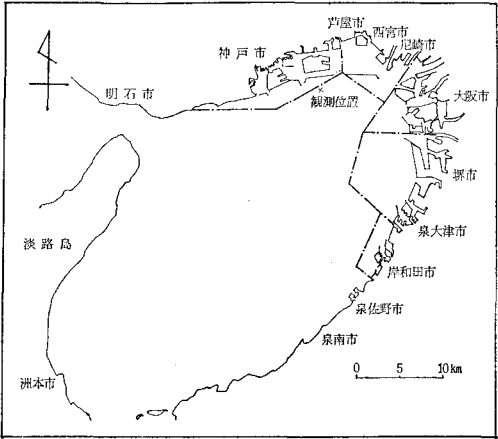
（1）観測方法

a) 波浪観測

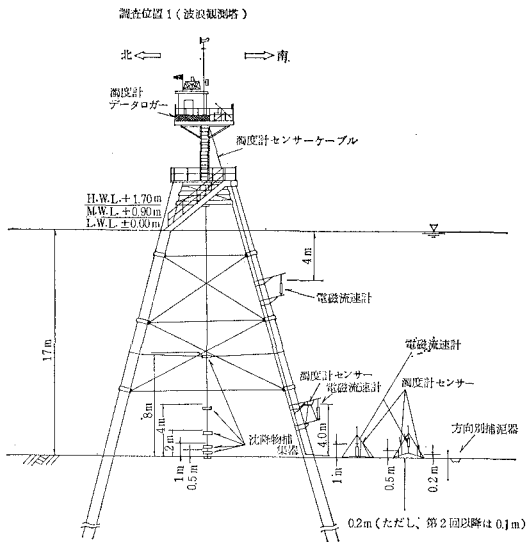
底泥の移動に関与する外力としての波浪条件を把握するために、既設の超音波波高計によって 2 時間毎に 20 分間の波浪データ（0.5 秒間隔）を取得した。

b) 底層流観測

底泥の移動に直接関与する底面付近の流れを把握するために、電磁流速計を海底面上、1.0、4.0 m 層及び海面下 4.0 m 層に設置し、2 時間毎に約 17 分間の流れの連続データ 0.5 秒間隔）を取得した。



図—1 観測位置



図—2 機器設置状況

c) 濁度観測

底泥の浮遊状態を把握するために、後方散乱光式濁度計を海底上 0.2、1.0、4.0 m 層に設置し、2 時間毎に約 17 分間の濁度の連続データ（0.5 秒間隔）を取得した。

* 正会員	(前)運輸省第三港湾建設局 環境技術管理官
** 正会員 工博	(前)運輸省第三港湾建設局 海域整備課長
*** 正会員	運輸省港湾局 計画課
****	運輸省第三港湾建設局 海域整備課
*****	運輸省第三港湾建設局 神戸港工事事務所

d) 浮遊物沈降量調査

濁度観測中の浮遊物の沈降状況を把握するために、沈降物捕集器 ($\phi 100 \text{ mm}$, $L=300 \text{ mm}$ の透明アクリル容器 8 本収納) を海底上 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0 m に設置し、また、底質の移動状況を把握するために、方向別捕泥器を海底面に設置した。

(2) 観測概況

観測海域の底質は、比重 2.5, 中央粒径 $24 \mu\text{m}$, 含水比 300% 程度のシルトである。

表-1 は、底泥の移動に關する外力条件として、波浪の有義波高及び周期、底層の流速について、観測期間中の平均値としてまとめたものである。なお、底層の流速は、測得した原データから 17 分間のベクトル平均値 (平均流) と振動流 (原データから平均流を除いたもの) に分離し、振動流についてはその振幅の 1/3 最大値を各時間の代表値とした。

表-1 各観測期間中の外力条件

調査回	調査期間	項目	平均流	振動流	波 高	周 期
		単位	cm/sec	cm/sec	cm	sec
第 1 回	S. 60. 8.30~ 9.4	B+0.5m	—	9	63.3	3.8
		B+1.0m	5.8	9		
第 2 回	S. 60. 10.5~ 10.14	B+0.5m	—	5	57.0	3.5
		B+1.0m	6.4	5		
第 3 回	S. 60. 10.28~ 11.1	B+0.5m	6.0	3	36.7	3.3
		B+1.0m	8.3	4		
第 4 回	S. 61. 1.25~ 1.29	B+0.5m	3.9	3	56.9	3.2
		B+1.0m	4.3	4		
第 5 回	S. 61. 1.29~ 2.4	B+0.5m	3.9	3	41.1	3.3
		B+1.0m	4.3	3		

観測期間中の外力条件としては、台風 12, 13, 14 号が相次いで日本近海を通過した第 1 回の観測時に、波浪、振動流が最も大きくなっていた。また、大潮期に実施した第 3 回の観測期間には、平均流速は最も大きかったものの波浪、振動流は最も小さかった。

外力条件が特徴的であった第 1 回観測時及び第 3 回観測時について有義波高 ($H_{1/3}$)、周期 ($T_{1/3}$)、平均流流速 ($U_b - \text{mean}$)、振動流振幅 ($U_b - V_{1/3}$)、浮遊物質量 (SS) の経時変化を図-3、図-4 にそれぞれ示す。ここで浮遊物質量は、現地の底泥を用いた室内実験により図-5 に示すように濁度と浮遊物質量の相関関係を求め、2 時間毎の濁度測定値 (平均値) より換算したものである。図-3 の波浪、振動流の大きくなった期間では浮遊物質量もこれらに対応して増加しているが、波浪、振動流が小さかった図-4 の観測期間では、浮遊物質量もほぼ一定の値を示している。一方、平均流の流速は、

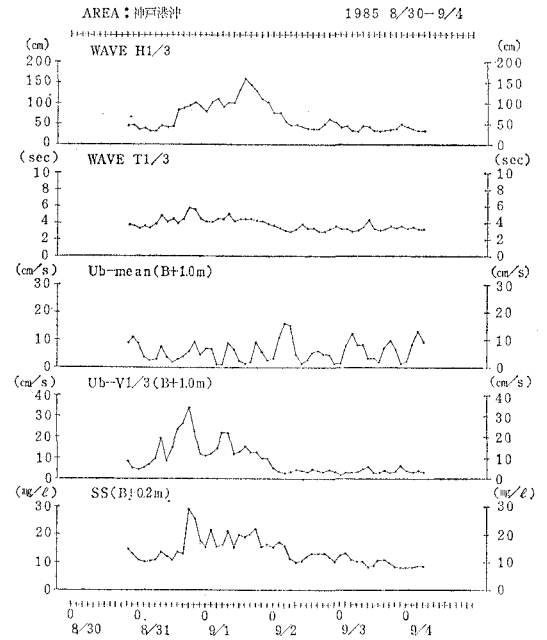


図-3 観測結果 (高波浪時)

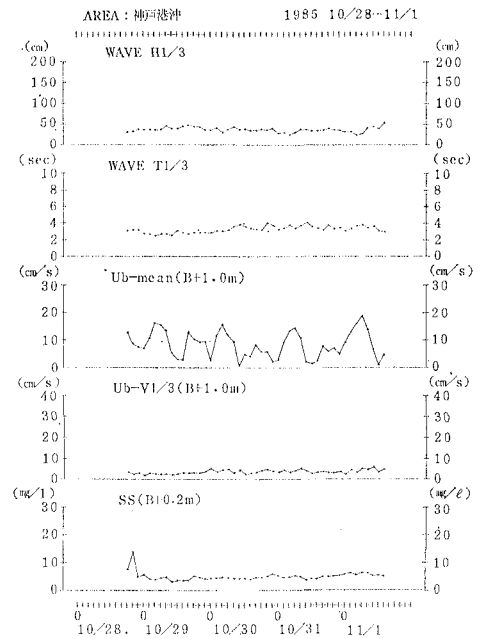


図-4 観測結果 (静穏時)

潮汐に対応して半日周期でピークがみられるが、浮遊物質量はこれに対応したような変動はみられない。

各観測期間中に捕集した沈降物の捕集量は、図-6 に示すように各観測回ともに、海底上 2 m より下では海底に近づく程捕集量が大きくなっているが、海底上 4 m

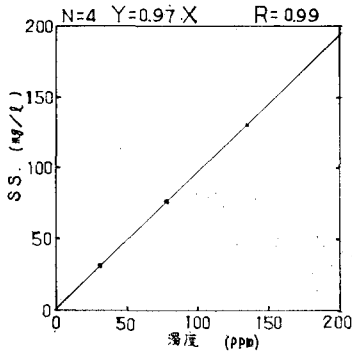


図-5 浮遊物質と濁度

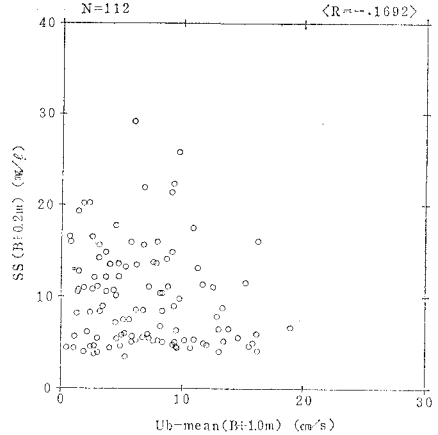


図-7 浮遊物質と平均流

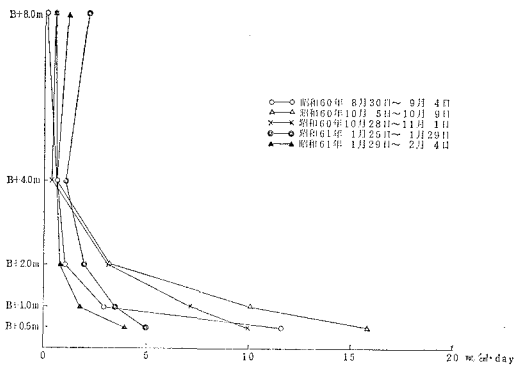


図-6 沈降物捕集量深度分布

より上層ではほぼ一定となっており、海底上 2m より下層では、海底からの供給（底泥の浮遊）があるものと考えられる。

3. 底質の移動と外力

(1) 平均流と底質の移動

図-7 は、浮遊物質質量 ($B+0.2m$: 底面から 0.2m の意味を表す。以下同様) と平均流流速 ($B+1.0m$) の関係を示すものであるが、両者には有意な関係が認められず、少なくとも平均流のみでは底泥を浮遊させる力とはならないものと考えられる。ここで用いた平均流は、図-3、図-4 からわかるようにその主成分は潮汐に起因する流れである。したがって、当海域では平均流(潮流)は、浮遊した底泥を移動させる外力となっているものと考えられるが、底泥の浮遊には直接関与していないものと推定される。

(2) 底泥の浮遊

図-8 は、浮遊物質質量 ($B+0.2m$) と振動流振幅 ($B+1.0m$) の関係を示すものである。両者には有意な相関関係が認められ、底泥の浮遊には振動流が大きく寄与していることがわかる。また、図-9 の $B+0.2m$ の浮遊物質質量とその上方の $B+1.0m$ 及び $B+4.0m$ の浮

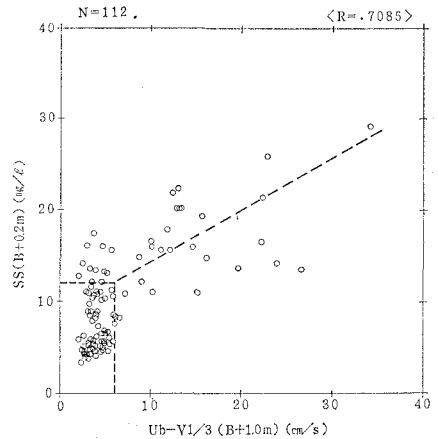


図-8 浮遊物質と振動流

遊物質量の関係を見ると、底面付近の濃度がある一定値以上にならないと $B+1.0m$ での濃度は増加せず一定値を示している。一方、 $B+4.0m$ では底面付近の濃度に関係なくほぼ一定した値を示している。これは、底面から直接浮遊する泥は、ある外力条件以上でなければ上方に浮遊拡散していかないことを示しており、底面からの底泥の浮遊限界を表わすものと考えられる。

これらの図より、底泥の浮遊が底面から 1.0m 程度まで生じる限界は、底面濃度で約 12 mg/l (図-9 (a)) であり、その底面濃度が出現する振動流振幅は、6 cm/sec 程度 (図-8) である。一方、振動流が今回測定された最大値、35 cm/sec 以下では、底面から 4.0m の層には到達しない。これは、図-6 に示した沈降物捕集結果と良く一致していた。また、今回の海象条件のもとでは、当海域での底泥の浮遊高さは底面から 2m 程度であると考えられ、その時の浮遊物濃度は底面付近でも 30 mg/l 以下であった。

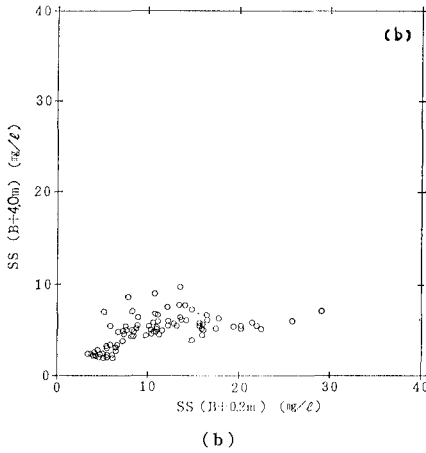
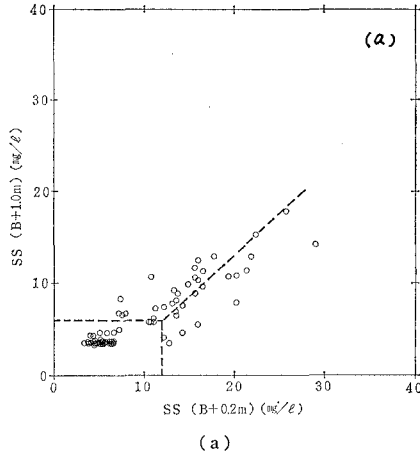


図-9 底面付近の浮遊物質と上方の浮遊物質

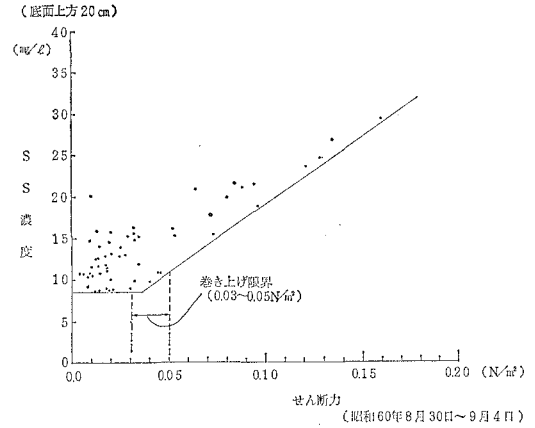


図-10 せん断力と浮遊物質

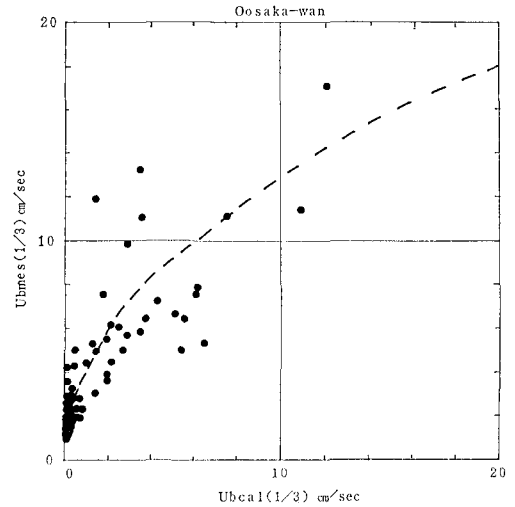


図-11 振動流振幅の計算値と実測値

(3) 底面せん断力

流れと波が共存する場合での底面単位面積当りに作用するせん断力は次式で表わされる。

$$\tau_{om} = \frac{\rho}{2} f_{cw} \dot{U}_w^2 \dots\dots\dots (1)$$

$$\dot{U}_w = \frac{\pi H/L \cdot (L/T - \bar{U}_c \cdot \cos \alpha)}{\sinh(2\pi h/L)} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 H ：波高、 T ：周期、 L ：波長、 h ：水深、 ρ ：海水の密度、 f_{cw} ：波・流れの共存場の摩擦係数、 u_w ：振動流の振幅、 u_c ：平均流速、 α ：流れの進行方向と振動流の方向がなす角である。

図-10 は、 f_{cw} を田中ら¹⁾ による方法で求め、式(1)により算出した底面せん断力と浮遊物質 ($B+0.2m$) の関係を示したものであるが、この図によると、底面せん断力が $0.03 \sim 0.05 N/m^2$ 以上となると底泥の浮遊が生じるものと推定される。

(4) 振動流と波浪

底泥を浮遊させる外力としては、底面付近の振動流が

重要な役割を果たしていることがわかった。しかし、底面付近の流れを観測することはまれであり、年間の移動量等を評価するためには、底面付近の振動流と波浪条件との関係を明らかにする必要がある。

表面波による水粒子の水平方向速度は、微小振幅波理論によると²⁾、

$$U = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh\{2\pi(z+h)/L\}}{\sinh(2\pi h/L)} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{L}x - \frac{2\pi}{T}t\right) \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 U ：水粒子の水平方向速度であり、 Z 軸は水面に原点をとり、鉛直上方を正としている。したがって底面における波による流速振幅（水粒子の水平方向速度の最大値）は、 $z=-h$ から、

$$U_b = \frac{\pi H}{T} \cdot \frac{1}{\sinh(2\pi h/L)} \dots\dots\dots (4)$$

となる。

図一11 は、底面付近での振動流振幅実測値 (1/3最大値) と、同一時刻の有義波諸元から式 (4) により計算した値を比べたものであり、計算値と実測値は完全に一致していないが、本観測結果の範囲に限れば式 (5) で近似される。

$$U_{b\text{ mes}} = 4.0 \times U_{b\text{ cal}}^{0.5} \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $U_{b\text{ mes}}$: 実測値 (cm/sec), $U_{b\text{ cal}}$: 式 (4) による計算値である。

この式 (5) を用いて、前述の底泥の浮遊が生じる限界流速 (約 6.0 cm/sec, $U_{b\text{ cal}} = 2.3$ cm/sec) 以上の振動流振幅となる波浪条件を算出すると、当海域では周期 4 秒未満ではほとんど底泥の浮遊を生じないが、周期 4 秒では有義波高が 1.4 m 以上になると浮遊し、周期 5 秒では有義波高 0.3 m 程度から浮遊するものと考えられる。

4. ま と め

底質の移動に関する現地観測により、以下のようなことが明らかとなった。

(1) 底泥の浮遊に直接関与する外力としては、波による底面付近の振動流成分が重要であり、潮流等の平均流は浮遊した底泥を運搬する移流現象にのみ関与しているものと考えられる。

(2) 底泥の浮遊は、一定の外力条件以上で生じる。その限界は、底面の振動流振幅で約 6 cm/sec 程度、底面せん断力で $0.03 \sim 0.05$ N/m² 程度と推定される。その時、底面付近での浮遊物濃度は、12 mg/l 程度である。

(3) 表面波による振動流振幅計算値と実測値を比較し底泥の浮遊が生じる波浪条件を求めると、当海域 (水深 18 m) では、周期 4 秒未満ではほとんど底泥は浮遊せず、周期が 5 秒を超えると波高 0.3 m 程度でも底泥が

浮遊する可能性があることが示された。

(4) 海底上 20 cm における浮遊物濃度は 30 mg/l 程度と低い値であった。これ以上の高濃度の汚泥の移動帯は、海底面のごく近傍に限られると推定されるので、これをふまえて浮泥の流入に対処していく必要があることがわかった。

5. あとがき

今回の現地観測とその解析結果より、大阪湾における底泥の浮遊の実態、またその外力条件などが明らかになった。このことから、底質浄化区域への周辺からの浮泥の流入防止策を考えていく上での貴重な資料が得られた。またこれらの結果は、大阪湾に限らず、底質浄化事業やこれに類似した事業が計画される他の同様な海域においても利用可能なものと考えられる。

なお、本報告は昭和 58~60 年度にわたって開かれた「大阪湾底質浄化工法調査委員会」(委員長、長尾義三京大名誉教授) において審議された内容をもとにとりまとめている。委員長をはじめとする先生方、なかでも岩垣雄一京大教授、榎木享阪大教授、堀口孝男東京都立大教授、田中則男前港湾技研海洋水理部長、ならびに入江功現部長には特別にお世話になったことを付記し深く感謝申し上げます。また現地観測とその資料整理には、三洋水路測量株式会社および株式会社エコーが誠意をもってこれにあたられた。ここに厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 田中 仁・首藤伸夫: 波流れ共存時の底面摩擦に関する実験, 第 27 回海岸工学講演会講演集, pp. 163~167, 1980.
- 2) 土木学会編: 水理公式集, 78 p, 1971.