

関西国際空港沖における潮流と波による底泥の巻き上げ現象

白石 修章*・飯島 眞治**・永野 国松***・中辻 啓二****

1. はじめに

関西国際空港は 24 時間運用可能な我が国初の本格的海上空港として 1994 年 9 月に開港した。さらに, 1999 年 7 月には沖側に隣接する人工島造成のため第 2 期工事に着手し, 現在護岸造成工事を行っている。空港島周辺海域の環境保全の観点から, 水質, 底質, 海生生物等について監視調査を継続的に実施している。このうち, 濁度等について連続的に観測を行っている水質連続観測調査結果を整理すると, ①高波浪時における底泥の巻き上げ現象, ②中潮期から大潮期の潮流最強時前後における底層濁度の上昇現象, ③夏季の降雨後における空港島周辺海域の低塩分化現象および④夏季から秋季にかけて表層でクロロフィル量と濁度の間に高い相関関係が出現するような特徴的事象がみられる。

本報告は, 空港島周辺海域で実施した現地観測の結果に基づき, 上述の現象の要因について解析を行ったものである。

2. 気象・海象および水質の変動状況

2.1 調査方法

大阪湾泉州沖に位置する関西国際空港周辺海域 (以下“当該海域”と呼ぶ) における, 高波浪時にみられた高濁度の出現および潮流最強時前後で出現した濁度の上昇傾向の要因を把握する目的で, 1999 年 8 月から 2000 年 3 月までの濁度等の観測結果を整理した。観測地点は図-1 に示すとおりである。

濁度 (透過光, 標準物質カオリン) は A 局, B 局, C 局において 10 分毎に表層から中層 (2 層), 下層 (海底上 2 m), 底層 (海底上 1 m) までの 5 層で, 波は D 局で, 水温・塩分・DO (STDO 計)・クロロフィル量 (クロロテック) は C 局でそれぞれ連続観測している。また, 潮流観測は 2000 年 1 月に A 局, B 局において底層と海底上 9 m の 2 層で 15 昼夜連続に, さらに底層付近の流速分布を詳細に把握する目的で 2000 年 4 月に A 局で海底上

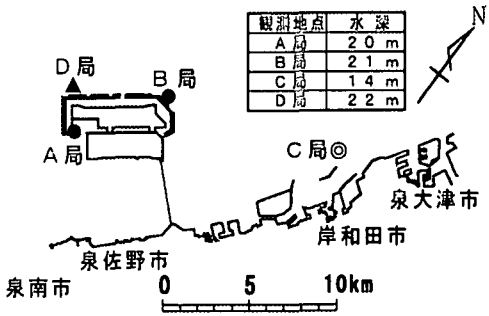


図-1 観測地点位置

0.5, 1, 2 m の 3 層で 1 昼夜観測した。

2.2 波浪と濁度との関係

波浪と濁度との関係を台風来襲時以外は静穏であった 1999 年 9 月と, 高波浪の出現が頻繁であった 2000 年 2 月を対象に, 各局で観測された底層濁度と波高の時系列を図-2 に示す。なお, 9 月の濁度の変動は日変動が卓越していることから, A 局を除いて図化した。

9 月の波高は, 有義波高, 最大波高ともに概ね 100 cm 以下であるが, 台風来襲時の 15, 24 日の両日は高波浪で

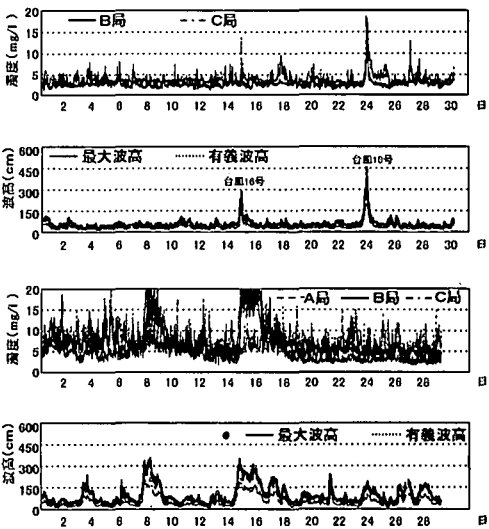


図-2 台風来襲時と冬季の波高と底層濁度の経時変化

* 正会員 工修 関西国際空港(株)建設事務所次長
** 三洋テクノマリン(株)環境コンサルタント部長
*** 三洋テクノマリン(株)大阪支社技術課課長
**** 正会員 工博 大阪大学教授 大学院工学研究科

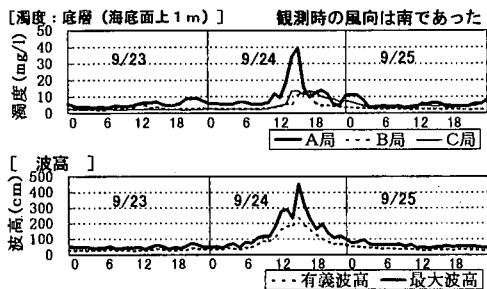


図-3 高波浪時の海底上1mの底層濁度と波浪状況

あり、なかでも24日の最大波高は450 cm(有義波高240 cm)である。一方、濁度は両月ともに潮汐による影響を受けているが、同時に波の高まりと良く対応し高濁度が出現している。2月の波高は、半数以上の日で最大波高が100 cmを越え、なかでも8, 15, 16日の最大波高は250 cm以上となっている。濁度は上記の3日はB局, C局で20 mg/l以上である。

9月と2月のうち、最大の波浪を観測した9月の台風来襲時(23~25日)における濁度と波高は図-3に示すとおりである。観測時の風向は南が卓越していた。全般的にA局で高く、特に波浪のピーク時に高濁度が出現している。

2.3 潮流と濁度との関係

調査期間中の濁度の測定結果と15昼夜の潮流観測結果より推算した潮流推算値を比較すると、各月とも潮流が速くなる中潮期から大潮期の潮流最強時前後において下層と底層濁度に上昇現象が認められる。図-4に2000年1月の大潮期にA局で観測された底層濁度と潮流の経時変化を示す。また、流向を南流時のみとした流速と濁度の散布図を図-5に示す。流速が20 cm/s以下では、濁度は平均4 mg/l程度であるが、流速25 cm/s以上になると底層の濁度は一様に急上昇することがわかった。

3. 底泥の巻き上げの検討

当該海域における濁度観測値を時系列に整理すると、高濁度の出現あるいは濁度の上昇傾向は、台風来襲時や冬季の高波浪時、さらに中潮期から大潮期の潮流最強時に多く出現することがわかった。このことは、高濁度の出現は波や潮流による底泥の巻き上げ現象が深く関与していることを示唆している。

底泥の巻き上げ現象を決定する要因は、波や流れ(外力)による海底面への摩擦応力(底面剪断力)および底泥の有する摩擦粘着力(限界剪断力)が考えられる。

外力に関する研究では、古くより対数分布則が知られており、白石ら(1999)も巻き上げ限界波高に関する結果を公表している。また、底泥の摩擦粘着力に関する研

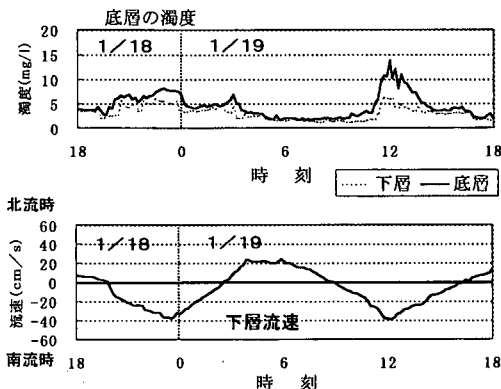


図-4 大潮期における下層流速と海底上1mの濁度の経時変化

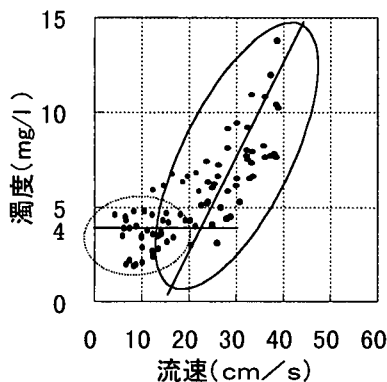


図-5 流速と濁度との関係

究は、大坪(1984)、鶴谷ら(1990)、村上ら(1989)、三村ら(1989)、中野ら(1991)による限界掃流力や降伏値に関する報告がある。

以下では、観測期間中の最大波高を観測した1999年9月の台風来襲時を対象に、上記の研究成果等に基づき波および潮流による巻き上げの可能性について検討する。

3.1 波による底泥の巻き上げの検討

当該海域における摩擦抵抗力(限界剪断応力) τ_c を現地底質調査結果の含水比と中野ら(1991)の底質降伏値および村上ら(1989)の円形タンク実験結果より求め表-1に示す。なお、 τ_b は底質の降伏値である。

また、各観測局の水深 h 、高波浪時の波の周期 T 等より底泥の巻き上げ限界波高 H を白石ら(1999)の発表による以下の式から求め、表-2に示す。

$$H = \tau_c T^{3/2} \sinh(2\pi h/L) / 3.195 \pi \rho \nu^{1/2}$$

検討対象日(1999年9月24日)の最大波高観測時刻は15時であり、有義波高の最大値は233 cm、周期5.7 s、最大波高は453 cmである。一方、底泥の巻き上げを生じ

表一 当該海域底質の含水比と限界剪断応力

[底泥の含水比の整理結果]

底質 調査地点	含水比 (%)				位置関係
	1999年5月	1999年8月	1999年11月	2000年2月	
No. 1	118.8	155.1	161.1	159.1	B局の東約2 km
No. 3	140.3	111.4	123.2	120.3	A局の西約3 km
No. 5	137.0	126.2	149.4	143.3	C局の西約5 km

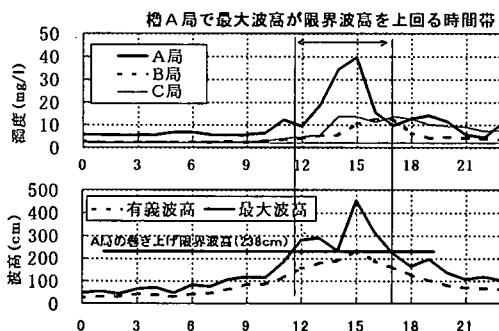
[限界せん断応力の検討結果]

含水比 (%)	161.1	τ_b (Pa)	5.79	τ_c (Pa)	0.32
---------	-------	---------------	------	---------------	------

表二 底泥の巻き上げ限界波高

周期 T (s)	波長 L (m)	A局		B局		C局	
		h (m)	H (m)	h (m)	H (m)	h (m)	H (m)
4.8	35.4	20	4.97	21	5.91	14	1.78
4.9	36.8	20	4.46	21	5.26	14	1.67
5.0	38.2	20	4.03	21	4.72	14	1.57
5.1	39.6	20	3.67	21	4.27	14	1.49
5.2	41.0	20	3.36	21	3.89	14	1.42
5.3	42.4	20	3.10	21	3.57	14	1.36
5.4	43.9	20	2.88	21	3.30	14	1.30
5.5	45.3	20	2.69	21	3.06	14	1.25
5.6	46.7	20	2.52	21	2.85	14	1.21
5.7	48.1	20	2.38	21	2.68	14	1.17

関連物理量等 $\rho: 1023 \text{ kg/m}^3$ $\nu: 1.198 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
 $\tau_c: 0.32 \text{ (Pa)}$



図一六 最大波高が限界波高を上回る時間帯の濁度変化

させる限界波高を求めると、A局で238 cm、B局で268 cmとなる。A局では、当日の有義波高はそのピーク時に巻き上げ限界波高と同等の値を示したが、その時点の底層濁度の変化をみるため、D局の最大波高とA局の海底上1 mの濁度の時系列変化を比較し、図一六に示す。

濁度が上昇し始める12時の有義波高は巻き上げ限界波高より約1 m小さいが、最大波高の推移は巻き上げ限界波高を越えている時間帯と底層で高濁度の時間帯と一致している。このことから、台風来襲時にA局でみられた急激な高濁度は波による底泥の巻き上げ現象によると説明できる。

3.2 潮流による底泥巻き上げの検討

底泥の降伏値 τ_b と含水比 W との関係は中野ら (1991)

により示されており、これから降伏値 τ_b を求めた。さらに τ_c は、鶴谷ら (1990) は底泥の降伏値と摩擦抵抗力 (限界剪断力) τ_c とは近似できることを明らかにしているが、ここでは大坪 (1984) の $\tau_c = 0.79 \tau_b^{0.94}$ より 4.12 (Pa) を得た。

流れによる掃流力 τ_0 は一般に摩擦速度 u^* との関係で示され、掃流力が限界剪断応力を越えた場合に生じるとされる底泥の巻き上げ限界時の摩擦速度と限界剪断応力の関係は以下の式で表せる。

$$\tau_c = \rho u^{*2}, \quad \rho: \text{海水の密度 (1.023 g/cm}^3\text{)}$$

以上の関係式より、底泥の巻き上げ限界時の摩擦速度を求めると、 $u^* = 6 \text{ cm/s}$ の結果を得た。

一方、底質の粒径区分より摩擦速度を粒径との関係で示す「岩垣式」では、以下のように示されている。

$$d \leq 0.0065 \text{ cm の場合, } u^{*2} = 226d$$

当該海域における底質調査結果のうち中央粒径 ($D_{50} = 0.0117 \text{ mm}$) から巻き上げ限界時の摩擦速度を求めると $u^* = 5 \text{ cm/s}$ を得た。

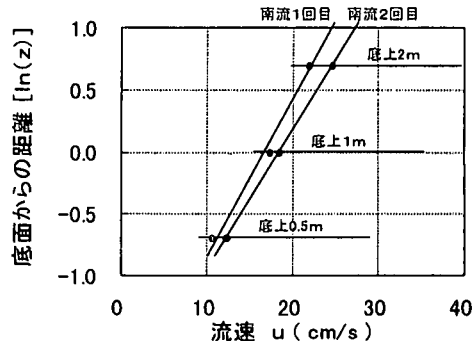
以上の検討より底泥の巻き上げを生じさせる限界時の摩擦速度は約 5.5 cm/s であると考えた。

つぎに、流れの鉛直分布に着目して検討する。図一七にA局で2000年4月に観測した潮流速度の鉛直分布を示す。なお、図中には南流時の2回の結果を示した。図より分かるように、底面から高さ2 mまでの底面付近では流速は概ね対数分布則を示している。

そこで、以下に示す対数分布則の式に、海底上0.5, 1, 2 mの流速実測値と先に求めた摩擦速度を適用し、巻き上げ限界時における海底上2 mの流速を求めた。その結果、図一八に示すように約 40 cm/s を得た。

$$U/u^* = 1/k \ln(z/z_0)$$

流況と濁度の経時変化を整理すると、濁度の上昇傾向は流速 20~25 cm/s を越える場合にみられる。また、潮流解析結果よりA局下層の流速が 40 cm/s を越えることはまれである。このように、既往の研究結果より求めた巻き上げ限界流速値と現地観測結果には差異が認められる。



図一七 層別の潮流速分布

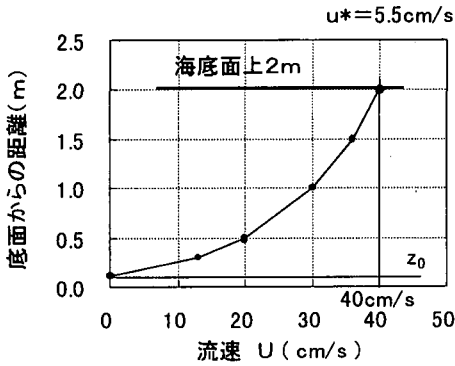


図-8 巻き上げ限界流速

大坪 (1984, 1986) は、底泥の再浮上機構の研究のなかで、二つの限界掃流力 (流送限界 τ_{cl} 、破壊限界 τ_{c2}) が存在することと、両者の間に一定の関係 ($\tau_{cl} = 0.5\tau_{c2}$) があることを示している。

この結果を用いると、本研究で求めた巻き上げ限界流速は約 28 cm/s となり、現地観測による濁度の上昇傾向がみられる流速帯と流送限界流速がほぼ一致した。

なお、潮流最強時にみられた濁度の最大値 (約 15 mg/l) は、台風来襲時 (約 40 mg/l) より低濃度であり、中潮期から大潮の潮流最強前後でみられる濁度の上昇傾向は、底泥の破壊に伴う巻き上がりではなく、底泥表面から粒子が浮上する現象と推察される。

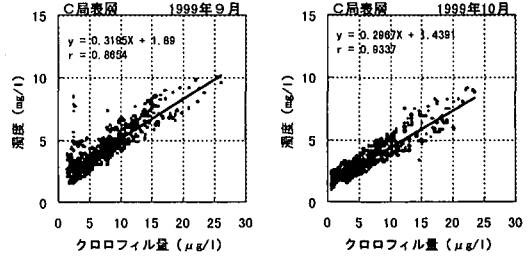


図-9 クロロフィル量と濁度の散布図

4. 観測データに見られた興味深い現象

4.1 クロロフィル量と濁度の関係

夏季から秋季にかけ表層のクロロフィル量と濁度、クロロフィル量と溶存酸素飽和度の間で顕著な相関関係が認められ、特に 9、10 月の表層で顕著である。そこで、クロロフィル量と濁度の散布図を図-9 に示す。

このことから、この期間における表層の高濁度の起源は生物的要因 (植物プランクトンの増殖) によるものであることを示唆していると考えられる。なお、夏季の表層における同様な現象は、中川 (1998) により伊勢湾でも確認されている。

4.2 河川水の当該海域への到達日数

本調査期間において降水量が 100 mm/日を越えたのは 1999 年 8 月に 1 回あった。この時、淀川の河川流量は

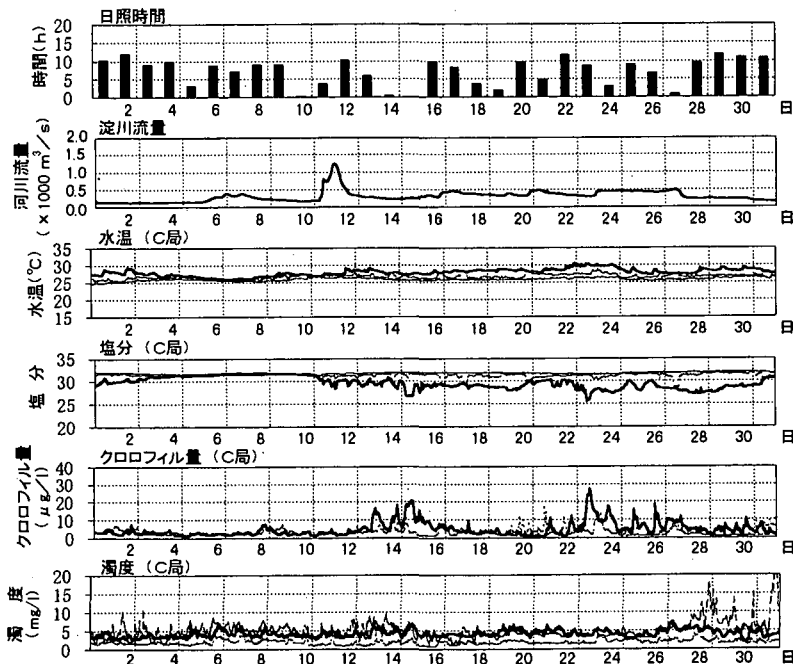


図-10 河川流量等の経時変化

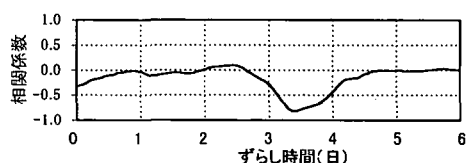


図-11 淀川河川流量とC局表層塩分の相互相関係数

最大 $1,000 \text{ m}^3/\text{s}$ を越えており、C局でその影響とみられる低塩分が観測されている。以下では淀川河川水が当該海域へ到達する時間について検討する。

8月の降水量、淀川河川流量(枚方観測所)およびC局で観測された塩分等を図-10に示す。特に、C局表層の塩分に着目すると、降水のピークを示す11日午前中から低下傾向を示し不規則な変動を繰り返しているが、淀川最大流量時より約3.5日後の15日午前中に顕著な低下が出現する。そこで、淀川流量とC局の表層塩分値とを相互相関分析した結果を図-11に示す。分析は降雨前の8月9日0時から21日0時までの12日間で行った。この図より3.3日後に明瞭な負の相関が認められる。

ここで、C局と淀川河口との距離は約25 kmであり3.3日後に到達すると考えると、約8 cm/sの移動速度となる。当該海域における潮流調査の解析より得られた恒流が7 cm/sであり、それに近い値が得られた。

このため、降水量、淀川流量および塩分の変化傾向より、C局における11日からの表層塩分の低下傾向は沿岸の中・小河川からの影響、15日にみられる顕著な塩分低下は淀川河川水の影響と考えられる。このように、淀川河川水が当該海域の低塩分化に影響を及ぼすのは、降雨による低塩分水塊の到達に遅れがみられるため、当該海域には降雨後3日程度に到達すると考えられる。

5. ま と め

5.1 底泥の巻き上げ現象について

関西国際空港第2期工事に関連する監視調査のうち、水質連続観測結果より高波浪時及び潮流最強時前後で出現する高濁度について、その要因を検討した。

波による底泥の巻き上げは、台風来襲時を対象として微小振幅波理論と底泥の含水比に基づいた巻き上げ限界波高と波、濁度の実測値を比較したところ、良く整合した。このことから、台風来襲時の底層における高濁度は波による底泥の巻き上げ現象と結論づけた。

潮流による巻き上げは、底泥の含水比、粒径の両面よ

り検討した結果、海底上2 mの流速が20~25 cm/sを越えた場合にみられる濁度の上昇傾向は、底泥の破壊に伴う巻き上げでなく、底面からの粒子の浮上現象との結論を得た。

5.2 観測データに見られた興味深い現象

水質項目間の相関性および淀川河川水が当該海域へ到達する日数について検討した。

夏季から秋季にみられる表層の高濁度の出現起源について検討したが、その起源は生物(植物プランクトン)によるものと考えられた。

また、夏季の降雨後、当該海域の低塩分化が観測された。この結果より淀川河川水が当該海域へ到達するのは降雨後約3日程度であると考えられる。

6. お わ り に

最後に、取りまとめに当たり貴重なご意見および多大なご指導を頂いた前港湾技術研究所海洋環境部鶴谷広一郎長(現(財)沿岸開発技術研究センター理事)に対して謝意を表します。

参 考 文 献

- 岩垣雄一・樫木 亨 (1979): 海岸工学, 共立出版, pp. 22-32.
- 大坪国順 (1984): 底泥の再浮上機構に関する基礎的研究, 京都大学学位論文, 138 p.
- 大坪国順・村岡浩爾 (1986): 流れによる底泥の飛び出し率, 土木学会論文集, 第375号/II-6, pp. 43-52.
- 近藤雅秋・戸原義男・平松和昭・四ヶ所四男・森 健 (1996): 潮流による底泥の巻き上げ特性に関する研究, 農業土木学会論文集, 第182号(第64巻第2号), pp. 109-115.
- 白石修章・宮本六男・雑賀修一 (1999): 関西国際空港周辺海域における底質の性状変化について, 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, 発表要旨集, pp. 17-1-5.
- 鶴谷広一・江口秀二・佐々木豊喜 (1990): 流れおよび波による底泥の巻き上げ限界, 港湾技研資料, No. 674, 13 p.
- 中川康之 (1998): 内湾域における泥質物の堆積過程に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第37巻, 第4号, pp. 113-133.
- 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.
- 中野 晋・伊東信幸・井上 洋 (1991): 波による底泥の流動限界と巻き上げ限界, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 461-465.
- 三村信男・田口 智・加藤 始 (1990): 底泥の波に対する応答と巻き上げ・沈降フラックス, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 230-234.
- 村上和男・菅沼史典・佐々木均 (1989): 円形回転水路による底泥の巻き上げりと沈降に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第28巻, 第1号, pp. 43-76.