

波浪・潮流による大阪湾底泥の巻き上がり特性

STIRRING-UP OF SOFT SEA BED MATERIAL DUE TO ACTIONS OF WAVES AND CURRENTS IN OSAKA BAY

高山知司¹・吉岡 洋²・田邊義隆³・大和 剛⁴

Tomotsuka TAKAYAMA, Hiroshi YOSHIOKA, Yoshitaka TANABE, Tsuyoshi YAMATO

1 フェロー工博 京都大学教授 防災研究所海岸海域分野 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

2 正会員 理博 京都大学助手 防災研究所海岸海域分野 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

3 正会員 工修 日本水工設計株式会社 東京支社 (〒104-0054 東京都中央区勝どき 3-12-1)

4 京都大学大学院 工学研究科 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

Stirring-up of soft sea bed material in Osaka Bay were investigated through field observations and hydraulic experiments. Field observations were carried out at the point of 14m-deep and 15km apart from Kansai International Airport. The bed material size at the filed is 0.01mm in mean diameter. Echo Intensity data of ADCP were used to detect the stirring-up of bottom material induced by wave and current. The threshold value of current velocity for stirring-up has been estimated to be about 20-cm/s. The different properties of stirring-up between fine sand and silt were has experimentally been checked in wave oscillatory flow in the wave channel. In less than 10cm/s flow condition, the fine sand was stirred-up easily with ripple formation. The silt needs faster current for stirring-up because it could not move individually.

Key Word: Stirring up, Siltation, ADCP

1. 緒論

底泥の巻き上がりは、東南アジア沿岸、有明海等で航路や泊地の埋没化（シルテーション）や、海底に堆積した栄養塩の再浮遊による汚染域の拡大等の問題を引き起こしている。また自然干潟の保存や人工干潟の創造に対しても、巻き上がり現象が関与している。波浪、潮流が底泥を巻き上げる条件を把握することができれば、海域開発の円滑化、海底地形の積極的な利用ならびに環境保全に貢献できるものと考えられる。

大阪湾東部は潮流が弱い停滞性海域である。そこへ淀川をはじめとする河川を通して、大量の栄養塩が陸地から供給され、大量の負荷物質として堆積してシルト質となっている。そのため、他の砂質海域の底質とはかなり異なった性状を示すものと思われる。

また、年々拡大してゆく湾内の埋め立てや防波堤設置によりこの流れ場が歴史的に変化してきて、従来の巻き上がり基準では対応できないことも考えられる。

そこで本研究は、大阪湾の底泥を対象として、巻き上がりの実態を把握する水理実験、ならびに現地観測データより波浪、潮流や気象変化、その他の環境条件を考慮した解析を行い、海底の巻き上がり特性の把握と巻き上がり基準を設定することを目的とする。

2. 観測データ

(1) 観測方法

大阪湾岸和田沖にあるコンパスロケーターにおいて、ADCP、濁度計、その他の水質計を用いて観測して得たデータと関西国際空港MT局で観測されたデータを用いた¹⁾。観測期間は、1997年9月14日～10月2日、1998年5月28日～8月24日である。観測地点の水深は約14mであり、海底は平坦な地形である（図-1）。

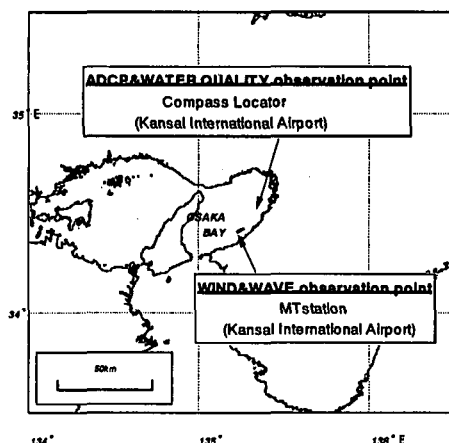


図-1 観測地点

(2) ADCP(超音波ドップラー流速分布計)

周波数は1200kHzである。水深約14mの海底に設置して、直上の水域を30層に分けて、各層の後方散乱強度(ECHO(1)~(30))と流速の水平2方向の成分を観測する。底泥が巻き上がると海底に最も近いECHO(30)およびその次のECHO(29)に高い値が出現すると期待される。ADCPは1997年9月14日~10月2日、1998年5月28日~7月15日ではコンパスロケーターの北側、7月15日~8月24日では南西側に設置している。記録データは、1997年は5分間、1998年は10分間の平均値をとっており、流速データには波による往復流は取り除かれている。

(3) 水質計測装置

濁度計は光透過型のものを使用した。海面から1m(上層)、海底から7m(中層)、1m(底層)のところに設置し、その位置での濁度を10分おきに観測、記録した。他の水質計も濁度計と同位置に設置し、その位置の水温、塩分、DO(溶存酸素量)を記録した(図-2)。

(4) 記録内蔵型波向計測装置(WAVEHUNTER)

海底にWAVEHUNTERを設置した。それは、水圧と水平2方向の流速を計測することにより、その地点の水位、波高(最大波高、1/3有義波高、1/10有義波高及び平均波高)、周期、波向、流向流速を1時間おきに記録する。波向は主波向と平均波向が算出される。なお観測期間は1998年6月10日~7月30日である。

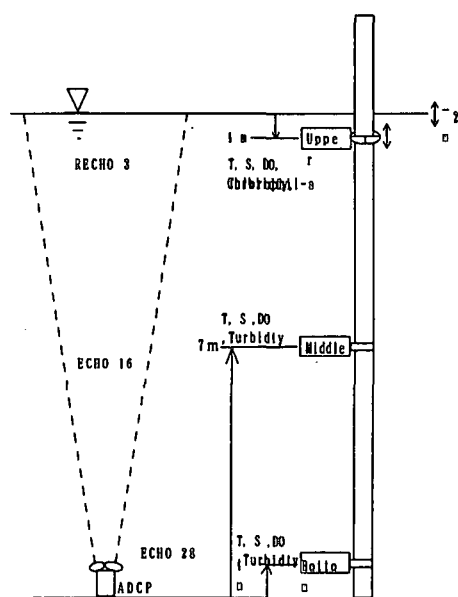


図-2 観測機器設置図

(5) 関西国際空港MT局データ

WAVEHUNTERデータとの比較や欠測した時期の値を補間するために、コンパスロケーターの南西約15kmに位置している(図-1)、関西国際空港MT局の波浪データ、有義波高および周期、波向、潮位の1時間毎のデータを活用した。

3. 水理実験

(1) 実験方法

図-3に示すように長さ26.4m、幅0.70m、高さ0.70m、両面ガラス張りの2次元造波水槽の中央部に長さ1m、幅0.40m、高さ0.30mの亚克力製の凹部を設け、ここに大阪湾の底泥の試料を満たした。水槽後部には1/10の勾配をつけて反射波の影響を軽減させた。凹部の上部には2台の容量式波高計を設置した。凹部の試料の中に3個の圧力計を表面下3cm、7.5cm、10cmの深さへ設置し、波作用下の底質内の圧力変化を測定した。

本実験で用いた試料は、関西国際空港MT局付近で採取された底泥で、黒色のシルト質(平均粒径は0.01mm程度²⁾)であった。ダイバーが潜水して海底表面に堆積したものを掬い取り、水中で容器に入れて密封して採集した。底泥との比較実験として、豊浦標準砂(中央粒径値0.17mm)を用いた実験も行った。

実験は、水槽凹部を標準砂で満たした場合と、凹部の7.5cmの深さまでは砂を入れ、残りを底泥で満たした場合について行った。水深は、標準砂利用時30cm、底泥利用時は30cmと20cmである。巻きあがりの判定は目視にて行なった。また水槽凹部真横からビデオ撮影を行い、波作用下の水中の様子を記録した。

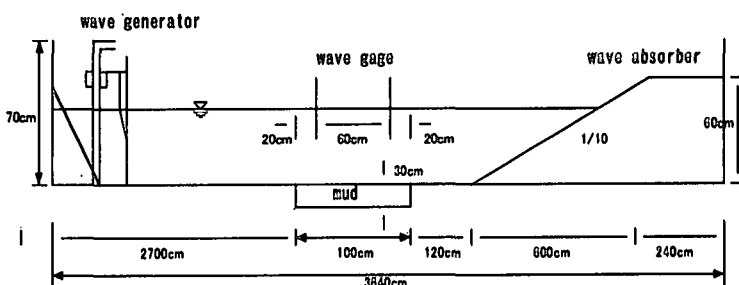


図-3 実験装置

(2) 実験結果

a) 豊浦標準砂の挙動

表面を平滑にしてから水槽に水を入れ、波を起こした。はじめの弱い波作用下では、表面は変化せず、平滑な状態を維持していた。造波装置の出力を上げ、徐々に大きな波へ変化させてゆくと、やがて表面上にかすかな線状の峰が、次々と見え始め、やがて小さな山型を形成してゆき、前進し始めた。峰の間隔が5~6cm程になると、水槽に直角な、直線状のリップル(砂漣)を形作り、峰の前進は止まった。このときの波高は9cm、周期は1秒、往復流の速さは7.4cm/sであった。形成される山の高さ、谷の深さはそれ以降、あまり変わることがなかった。砂がリップルの峰を超えてゆくととき往復流が前進から後退、或いは後退から前進するときに巻き上がりが顕著であった。特に往復流の方向が切り替わる時の浮遊粒子は、一斉に方向を鉛直方向に変えることが観察された。

b) 底泥の挙動

底泥が巻き上がりはじめるときの流速を求めるため、造波装置の出力を上げたり、造波周期を変えることによって、往復流の水粒子速度を上げていった。しかし、造波装置の出力が弱かったため、底質の表面付近で生じた速度は高々9~10cm/s程度であり、明確な巻き上がりには至らなかった。しかし、微小粒子が小さい水粒子速度で巻き上がる場合が3例あったので、それを説明する。

・ 底質表面を繰り返したとき

底泥を満たして波を起こすとまず、微小粒子のまい上がりが認められる。しかし、造波を続けるうちに底質表面の微粒砂がなくなると、より大きな波を与えても巻き上がりが生じない。そこで、泥質をよく掘り起こした後で表面を平滑にして、波を作用させると、瞬時に水中がうすく濁った。それは底質の泥粒子が巻き上がったのではなく、泥層の表面の微細粒子がほぼ鉛直に上ってゆくのである。それもしばらく波を受けると表面の微細粒子は出尽くし、また、濁りも拡散して、巻き上がりは止まってしまった。

・ 長周期の波を作用させたとき

できるだけ大きな海底上の往復流速を得るために、4秒の周期をもつ波を起こして、底泥上に作用させると、砂の時ほど規則正しい配列をしてはいないが、うろこ状の、大きさ1cmほどの小さなリップルが多数観察された。リップルが生じた時、表面の落ち込んだ部分に、表面部分からはがれた、やや大きめの泥粒子が集積していた。この粒子は波の運動とともに落ち込みを出たり入ったりするが、時には渦を巻きながら水中へ放散してゆく。また長周期時の波は形が崩れ、倍調波が生じてサインカーブを描いていなかった。そのためか浮遊した泥粒子が波とは逆の方向に漂っていくことがあった。

・ 底質全体が微小振動する時

波作用下において、容器内の底質全体がわずかにではあるが前後に振動する時があった。微小振動が起こった状態では瞬間的に巻き上がりが生じていた。しかし、これは水槽凹部の境界で隙間が生じた所で小さなずれが起こっている為である。この状態は底泥を繰り返した時に生じたので、含水比等底質内の水の量に影響しているかもしれない。

以上実験によって、泥層表面にはたらく流速が10cm/s程度ならば巻き上がりは生じず、明らかな巻き上がり現象をみとめるにはさらに大きな流速が必要であることがわかった。また、底泥の状態、或いは底泥に作用する波の状態によって、巻き上がり方にも違いが生じることがわかった。しかし実験は砂層の上に泥層を設けたこと、海水ではなく真水を利用したこと、水深十数mから採取した底泥を20~30cmという浅い水深で行ったため水圧が著しく小さいことなど、採取地点の底泥におかれた状況と異なる点があった。

4. 現地観測結果

(1) 時系列データの整理

対象期間を14に区分してそれぞれ観測データの時系列変化を示した。区分期間の1つである、図-4について説明する。図中の一番上は水深約8mから海底までのADCP後方散乱強度(以後、反射強度と呼ぶ)のコンタグラフ、2番目は海底付近の流速ベクトル、3番目は一定水深ごとの反射強度、4番目図は海底付近の流速絶対値、5番目は濁度、6番目は波高、7番目は周期、8番目は潮位、9番目は相対水深(水深を波長で割ったもの)、10番目は海底の波浪往復流の振幅、11番目はADCPが測定した水平成分の流速から算出した潮流の流向、12番目はWAVEHUNTERが算出した主波向、13番目はADCPが測定した流速と往復流による水粒子速度との和 $u+CV$ 、14番目は溶存酸素量(DO)である。

相対水深は波長によって変化して、これが0.5を下回ると波が海底付近に与える影響は無視できる。

波浪往復流の振幅 u の時系列データは、波が微小振幅波であると仮定したときの、浅海波の水粒子速度の式

$$u = \frac{H}{2} \cdot \frac{gT}{L} \cdot \frac{\cosh\{k(h+z)\}}{\cosh(kh)} \cos(kx - \omega t) \quad (1)$$

に最大波高、最大波高時の周期を代入して算出した。

$u+CV$ はWAVEHUNTERが観測された期間(1998年6月11日~7月31日)においては、潮流と最大波高・周期から推算された往復流とのベクトル和、観測されなかった期間(1997年、1998年5月28日~6月10日と8月1日~8月24日)は潮流と最大波高・周期から推算された往復流との単純和を示す。

(2) 時系列データに見る巻き上がり状態

巻き上がりがどのような環境条件で生じているかを具体的に把握するために、代表的な巻き上がり事例を、14に区分した時系列データを順に追って調べた。その結果、底泥の巻き上がりと波浪、潮流に関するデータとの関係についてまとめると以下ようになった。

- ・ 潮流の流速や波高の値から判断して、巻き上がりが生じていると推定されるのは、ECHO(29)が70dBを超えたときである。しかし、70dBを超えないものについても、ECHO(29)のデータに急激な上昇傾向がある場合、ECHO(30)において上昇が認められる場合は小規模な巻き上がりが生じているといえる。巻き上がり現象が顕著に見られるのは、最大波高 H_{max} が70cmを超えたところからであり、潮流が10cm/s以下であっても、波高が高ければそれに伴いECHOの値は上昇する。

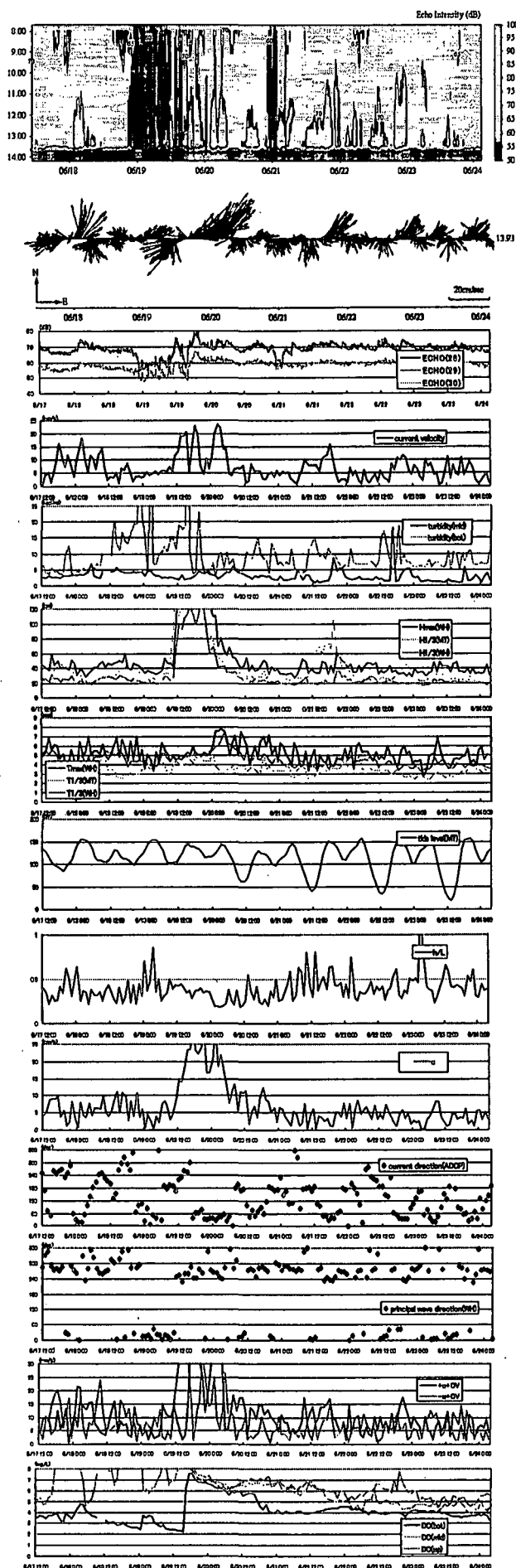


図-4 時系列データ

- 波高が小さくても潮流の速度が 20cm/s 以上の大きい時に、巻き上がりが起こる場合があり、それは満潮の北流最大時や干潮の南流最大時に生じている。
- 大規模な巻き上がりが生じていると考えられる時期において、上層、中層、底層の DO の値が接近している場合がある。通常 DO は、植物プランクトンの光合成の関係から、光が届く浅い層ほど高い値を示すにも関わらず、このように一定の値を示す時期があった。これは水中の上下混合が激しいことを示しているものと考えられ、巻き上がりが発生しやすい状態を表していると言える。

5. 考察

(1) 潮流と往復流との単純和、ベクトル和

ADCP から得られた海底付近の潮流の流速と、計算によって求めた往復流の水粒子速度がいずれも 5~25cm/s と同じ位のオーダーであった。潮流の流向、波向（図-4 上から 11, 12 番目）を見ると変化が大きく、特に流向は潮汐の運動に伴い変わっている。よって潮流と波浪による往復流の 2 次元的な運動を包括的に捉えて巻き上がりを検討する必要があると考え、両速度のベクトルの和をとった。なお、ベクトルのなす角度は、ADCP データの水平 2 方向成分から算定した潮流の向き、WAVEHUNTER の記録した主波向から求める。往復流の水平成分は波の進行方向に前進、後退を繰り返すこと、しかも水粒子速度の最大時を考慮して式(1)の $\cos(kx - \omega t) = 1, -1$ それぞれについてのベクトル和を求めた。さらに、振動流が同時刻で前進、後退したときのベクトル和のうち大きいものをその時刻の代表する流速（以後、 $u+CV$ と記す）とし、それと ECHO(29)との対応を調べた（図-5）。その結果、流速が大きいにも関わらず反射強度が大きな値を示さなかったり、或いは小さな流速で大きな反射強度を示したりした。この原因として考えられるものを列挙すると以上ようになる。

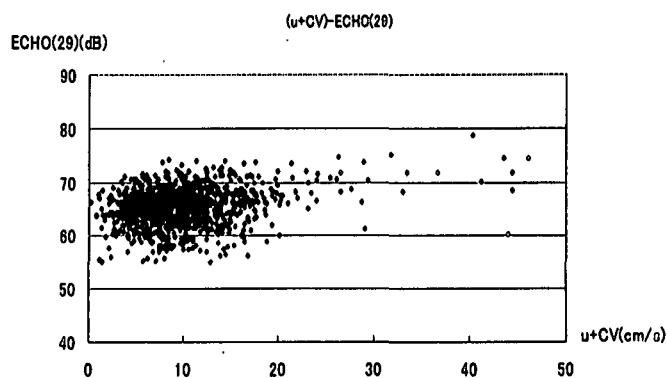


図-5 $u+CV$ と ECHO(29) の相関 (98 年)

- 波浪、潮流が引き起こした巻き上がり現象ではなく、プランクトンや気泡といった散乱体による超音波反射の可能性

プランクトンはその種類、形、大きさで様々な反射強度をとることが報告されており、海水中では場所を問わず生息しているので、ADCP の発した超音波によって検知されることもあり得る。

- 最大波高 $T_{max}(WH)$ の考慮によるもの

往復流による水粒子速度の式(1)には、最大波高 $H_{max}(WH)$ と最大波高時の周期 $T_{max}(WH)$ を代入している。海底の巻き上がりにおいて、有義波高のような平均値を適用するより、その時間における最大の波高を用いた方が海底への影響をより忠実に表現できると考えたからである。しかし大半は $H_{max}(WH)$ より小さな波が起きているはずであるから、ベクトル和が実際より過大に評価されていることが考えられる。

- 巻き上がった後の底泥が海底に沈下せずにそのまま漂っている。

流速が大きい時に巻き上がった底泥が、流速が減少したにも関わらず、浮遊し続けるために大きな反射強度を示した。

以下では 3 番目の可能性について検証をしてゆく。

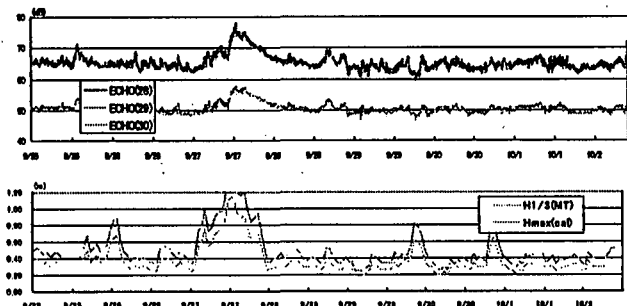


図-6 ECHO(29)と波高の時系列データ (97年9月25日～10月2日)

(2) 巻き上がりの浮遊時間を考慮

図-6 の ECHO(29) と波高データの挙動を比較する。両者は9月27日のはじめから増大傾向を示し、正午同時期に、ECHO(29)は76dB、 $H1/3(MT)$ は117cmのピーク値を示した。しかし、その後波高は減衰し、同日終わりに27cmまで下がるのに対して、ECHO(29)は緩やかに減少し増大前の値に戻るのには28日の午後であった。波の高揚時には海底で往復流の影響が強いと思われ、それに伴い巻き上がりも生じていると推測される。しかし波が減衰した後なお ECHO(29)が高い値を維持し続けているのは、巻き上がった泥粒子が海底に再び沈下するまでに時間を要するため、それがECHO(29)の値に反映すると思われる。

流速のベクトル和と ECHO(29)との相関(図-5)において、ベクトル和が小さい値から、ECHO(29)が70dB以上の高い値をとるのは、この巻き上がりの浮遊時の影響があると考え、以下の検証を行った。

反射強度が70dB以上を示すものを巻き上がりが生じていると考え、ECHO(29)の時系列データから、70dB以上を示す時期を抽出する。それらの時期で、ECHO(29)がピークを示したときから落ち込むまでの時間を、底泥が浮遊している時間と特定した。その時間のデータを除去してからベクトル和、ECHO(29)の相関をとった(図-7)。図は除去後のデータを波高、潮流の流速、往復流速の大きさに別に区分したものである。ECHO(29)が落ち込む値は時系列データのグラフの挙動、数値を吟味した上で判断したため、明確な値は定めていない。

1997年のデータ、1998年5月28日～6月10日と8月1日～8月24日のデータにおいては、WAVEHUNTERによる観測が行われていないため主波向が欠けている。そこで水粒子速度 u と ADCP が記録した流速との和と、ECHO(29)との相関をとった。そして、1998年 WAVEHUNTER データによるものと同様に、ECHO(29)の値のピーク後から落ち込むまでの時間のデータを除去して、相関をとった(図-8:1997年データ、図-9:1998年データ)。その結果、図-7ではECHO(29)が増大する傾向が、20cm/sを超えてはじめて見られ、図-8、図-9では、30cm/sを超えてはじめて見られた。

図-8、図-9は往復流と潮流のベクトルの合成ではなく和をとったため、図ではばらつきが右にシフトしていると思われる。よって、潮流と往復流のベクトル和を考慮した場合から、大阪湾の底泥が巻き上がりはじめる時の値は、およそ20cm/sであると推定した。

先に求めた潮流と往復流のベクトル和は式(1)の $\cos(kx - \sigma t)$ を1、-1として求めた。しかしこれは最大値、最小値である。往復流は時間に伴い絶えず変化し続ける点において、潮流とその性格を異にする。潮流は長期的に見れば、その速度や向きを変化させるが、短期間で考えると一定である。これら往復流の周期的な速度変化をする流れと、潮流の様な流れを巻き上がりに対して同等に扱うことの妥当性を検討する。

図-7、図-8、図-9は、波高 H_{max} は60cm、潮流の流速 CV は10cm/sと20cm/s、往復流の流速 u は10cm/sをそれぞれ基準として、その値より大か小かにより区分したときの $u+CV$ と ECHO(29)の相関をとったものである。それによると、 $u+CV$ の値が概ね

- H_{max} 小, CV 小, u 小
- H_{max} 小, CV 中 (10~20cm/s)
或いは H_{max} 小, u 大
- H_{max} 大, CV 中
- H_{max} 大, u 大

の順に大きくなっている。いずれの図も、 $u+CV$ の中速域 (10cm/s < $u+CV$ < 20cm/s) では $H_{max}(WH)$ が60cm未満

で潮流の流速が 10~20cm/s の状態が頻繁に生じているが、大部分は反射強度が 70dB を下回っている。

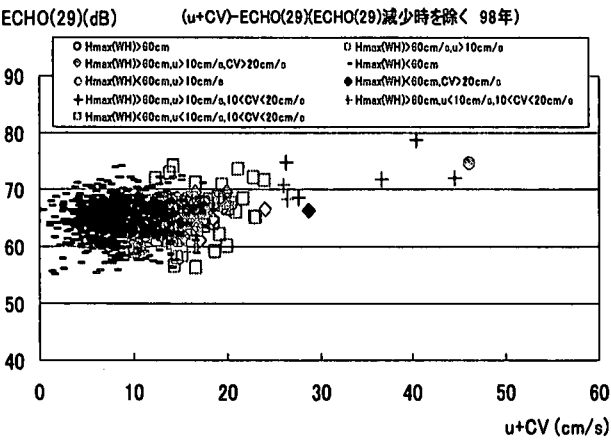


図-7 浮遊時間除去後の $u+CV$ と ECHO(29) の相関(98 年)

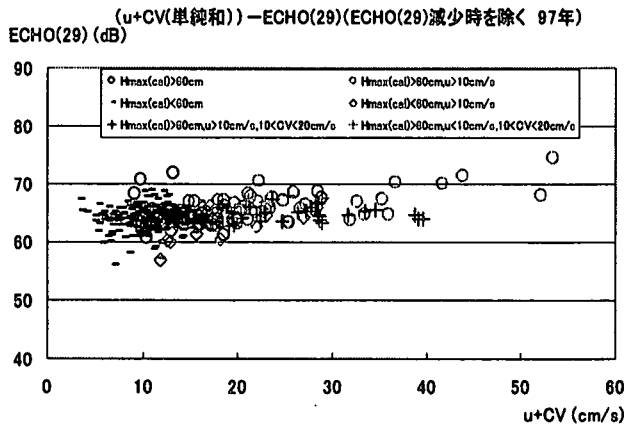


図-8 浮遊時間除去後の $u+CV$ と ECHO(29) の相関(97 年 WH 不測定)

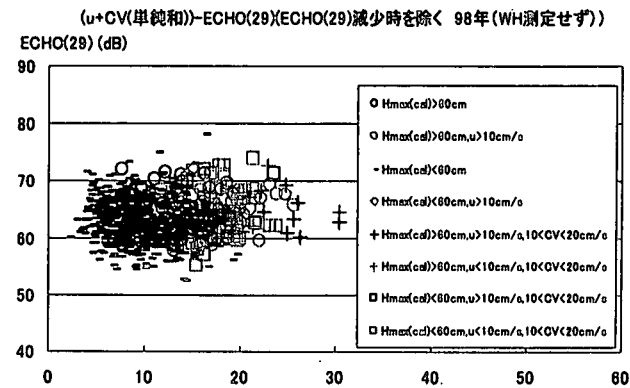


図-9 浮遊時間除去後の $u+CV$ と ECHO(29) の相関(98 年 WH 不測定)

また、図-8、図-9 では、 H_{max} が 60cm より大(図中の丸印)であれば、 $u+CV$ が 10cm/s 以下の小さいときでも

高反射強度を示している。

よって、巻き上がりが起こるのは波による往復流の影響があるときである。潮流のみ作用する海底では、流速が 20cm/s 以下では巻き上がりは起こらないと思われる。

(3) 潮流と往復流の性質を考察する

潮流と往復流の合成によって、反射強度との間に高い相関が得られたことや、20cm/s を超える流速をもつときに大きな反射強度を示していることを考慮すると、巻き上がりを引き起こす要因は主に波の運動によるものであり、潮流はその運動によって起きた巻き上がりを、助長する形で影響を与えていると考える。また波作用下では往復流が 10cm/s 程度の速度でも巻き上がりが起こり得ることから流速以外の波の特性が起因している可能性がある。たとえば、往復流の周期的な変化や強弱により底泥表面の粒子間に変化が起きることが考えられる。

6. 結論

本研究は、実験によって巻き上がり時に伴う現象や巻き上がりやすさの検討を行った。また、1997年9月と1998年6、7、8月の波浪と潮流に関わる観測データから、巻き上がり時例の抽出と巻き上がり基準の設定を行った。以上のことをまとめて、本研究で得られた結果に対して結論を述べる。

- 底泥の巻き上がりの指標として ADCP の測定する後方散乱強度が利用できる。巻き上がりを示すのは海底近傍での値が 70dB を超えたときに顕著である。
- 実験によって、往復流による流速が 10cm/s 程度ならば、底泥の巻き上がりが起こらないことが確認された。また、潮流の流速ベクトルと波による往復流のベクトルとの合成成分と、後方散乱強度の関係から、大阪湾の底泥が巻き上がりはじめるのは、合成ベクトルがおおよそ 20cm/s に達する時であると推定した。
- 波浪と潮流を比べると、底泥の巻き上がりは波浪によるところが大きく、潮流は波浪の運動を助長している。

謝辞

貴重な観測資料を提供していただいた関西国際空港株式会社に謝意を表します。

参考文献

- 1) 吉岡洋・高山知司・田邊義隆・加藤久晶(1999): ADCPによる沿岸水質の長期モニタリング, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 1301-1305
- 2) 白石修章・飯島眞治・永野国松・中辻啓二(2000): 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, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 1076-1080