

現地用レーザ流速計を用いた碎波帯内の乱れおよび 浮遊砂に関する現地観測

灘岡和夫*・鈴木 徹**・八木 宏***・神尾成也****

1. はじめに

近年、碎波帯内の流速場に関する研究が特に室内実験を通じて精力的に行われ、碎波帯内の特徴的な乱流構造の実態が急速に明らかにされてきている（例えば、Batjes, 1988; Peregrine, 1983）。しかしながら、測定器上の制約もあって現地での計測例はごく少なく、乱れの構造や底質浮遊との関連などは断片的に調べられているだけで系統だった計測はされていない。

本研究では、最近開発した現地用レーザ流速計（FLV）を用いて運輸省波崎海洋研究施設で4日間にわたって行った碎波帯内の乱れや浮遊砂に関する観測結果を報告する。この観測では合計13回の測定を行ったが、その間波浪条件や水深などがかなり変化しており、結果的に比較的広い範囲の水理条件下での計測結果が得られている。そこで、ここでは特にこのような水理条件の変化と乱れ強度や底質浮遊との関連に焦点を絞って解析した。

2. 観測地点並びに観測方法

1989年10月30日から11月2日の4日間、茨城県の鹿島灘に面する運輸省波崎海洋研究施設（HORF）において現地観測を行った。

この施設は、全長427mの観測棧橋および観測室からなり、鹿島灘と鹿島港と波崎港の間の遠浅砂質海岸（平均粒径約0.19mm）のほぼ中間に位置している。棧橋には、計器取り付け用の片持ち梁式 ladder が取り付けられているが、今回はその ladder に現地用 LDV ならびに浮遊砂濃度計（光電管式濁度計、（株）ケネック製）を一台ずつ取り付けて測定を行った。また、測定地点上の棧橋デッキ面には約2m岸側に超音波波高計（（株）ケネック製）が取り付けられている。FLVの設置位置は底面上10~40cm（run 11以降は110~130cm）で、濃度計は底面上5~40cmである。また、観測期間中の測定時間帯・海象・気象条件は図-1に示すとおりで、図-2に現地での装置配置図の例を示す。

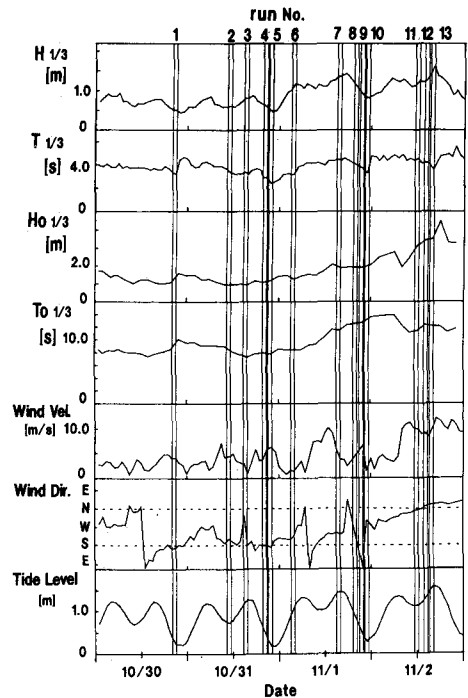


図-1 観測期間中の計測時間帯・海象・気象条件

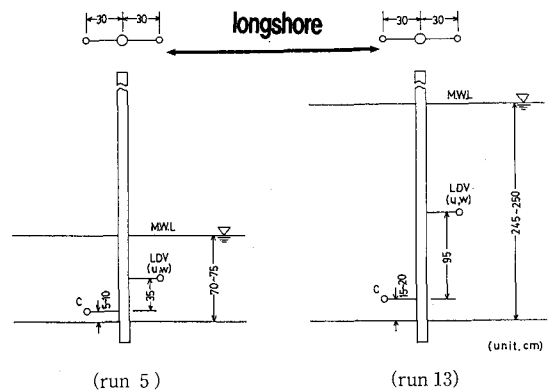


図-2 測定装置配置図

* 正会員 工博 東京工業大学助教授 工学部土木工学科
 ** 工修 運輸省
 *** 正会員 工修 東京工業大学助手 工学部土木工学科
 **** 学生員 工修 東京工業大学大学院

3. 現地碎波帯内における乱れの特性

(1) 生データおよびスペクトル解析結果

次に、図-3は、得られたデータの時間変動の例として run 5 の記録を示したもので、上から順に超音波波高計による水表面水位 η 、FLV による水平流速 u 、鉛直流速 w 、ドロップアウト率 D. O. R、光電管式濁度計による浮遊砂濃度 c を示している。ここでドロップアウト率とは、FLV による流速測定が一時的に不可能になった場合に出力されるドロップアウトシグナルの単位時間内の発生割合を意味している。

水表面水位 η の時間変動を見ると、波のクレスト位相直前に急激に水位が増大し、結果的にのこぎり刃状の非常に前傾した波形となっていることがわかる。このように、ここで対象としている波はかなり急激な位相変化を伴うものだが、これに対応して FLV で計測された u のデータ上に η にほぼ同期する形で急激な流速変動が激しい乱れとともに記録されており、このことから今回開発した現地用 FLV が今回のような厳しい計測条件下でも基本的な流速データを取得できるものとなっていることがうかがえる。

次に、得られた生データの周波数特性を知るために、 η 、 u 、 w のパワースペクトルを算出した結果を図-4に示す。

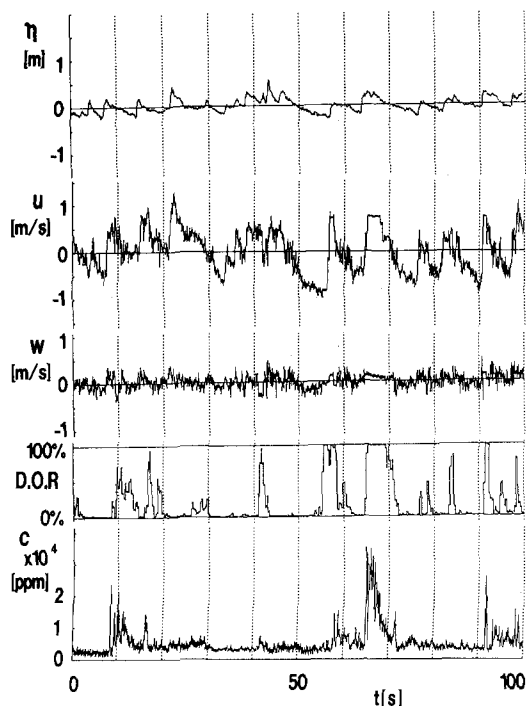


図-3 run 5における η 、 u 、 w 、ドロップアウト率、 c の生データ

まず u と w のパワースペクトル特性であるが、これについては、すでに室内実験での計測結果がいくつか報告されている。しかし、現在までのところ統一的な見解は得られていない。例えば灘岡ら (1982) は、高周波領域のパワースペクトルの傾きが、 u 、 w ともにほぼ $-5/3$ 乗則に従うと報告しているが、青野ら (1983) は特に w が -3 乗則ないしは $-5/2$ 乗則に従うと述べている。今回の現地データの解析を見ると、 u と w ともにほぼ $-5/3$ 乗則に従っており、灘岡らの室内実験の結果と符号した形となっていることがわかる。

(2) 碎波に伴う乱れの特性

観測した全 13 ケースにおけるスペクトル解析結果には、高周波領域の傾きが $-5/3$ よりゆるく、ホワイトノイズの成分を含む形のものが見られた。そこで、そのようなノイズ成分を分離するために、数値フィルター法により、15 Hz を cut-off 周波数として高周波成分を抽出するとともに、15 Hz 以下の成分について $u \times w$ の値を算出した (ただし、生の流速データには流速計の傾きによる

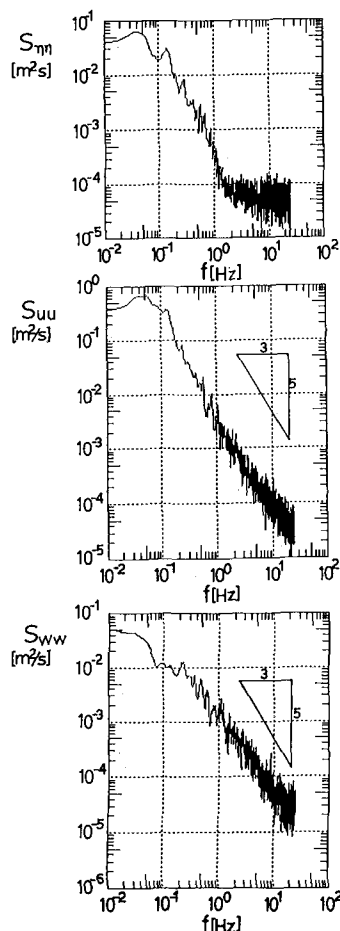


図-4 run 5における η 、 u 、 w のパワースペクトル

ものと考えられる主軸の傾きが見られたので、その傾きを修正したデータに対して数値フィルター法を適用した。それらの結果を、run 5 と run 13 における水面水位 η とあわせて、図-5 および 図-6 に示す。図中、'noise' とあるのが上記の高周波成分である。

まず、 $u \times w$ の時間変動パターンを見ると、 η あるいは u の図からクレスト通過直後と考えられる時に負のピークが現れていることがわかる。これは（瞬間）レイノルズ応力であれば、このような位相で正のレイノルズ応力が生成されていることを示している。このことは、通常の純粋な波動場では起こり得ないことであり、砕波に伴う何らかの大規模渦によるものと考えられる。それには、灘岡（1984）らが、室内実験の結果にもとづいて明らかにしている「斜降渦」に対応した渦構造の存在が考えられる。ただし、それを具体的に検証するには今回のデータだけでは不十分であるので、今の段階では、推測に留めざるを得ない。なお、図-3 で波のクレスト通過直後に濃度信号が急増する場合があるのは、上述の斜降渦が底面まで到達し、その結果多量の砂が底から巻き上げられたことによるものと考えられる（灘岡ら、1987 a, b）。

つぎに、図-6 の高周波成分を見ると、バックグランドノイズの他に有意な大きさをもった特徴的なノイズ成分が主としてクレスト通過直後の位相に現れているのがわかる。浮遊砂濃度の生データをみると、後の図-8 で示す run 13 では、run 5（図-3）ほど濃度信号の急激な増大

は現れておらず、底質からの砂の多量の巻き上げ現象はほとんど生じていなかったと考えられる。したがってこのような特徴的なノイズが現れた原因としてはむしろ砕波に伴う連行気泡によるものと考えられる。実際、run 5 と 13 の波高を比べると圧倒的に run 13 の方が大きく、したがってかなり大規模な砕波が生じていたことから、連行気泡も run 13 で顕著であったものと考えられる。

4. 水理条件の変化と乱れ・浮遊砂の発生パターンの関係

今回の現地計測では 4 日間の合計 13 回の測定データが得られているので、ここでは測定期間中の波浪や水深等の水理条件の変化と、乱れや浮遊砂の生成パターンとの関係について検討してみた。

（1）bore の波高水深比および前傾度と乱れ強度の関係

まず、砕波帯内の乱れの規定要因を明らかにするために数値フィルター法によって各 run ごとに算出した平均乱れ強度 u' の経時変化と、bore の水理特性量との関係を探ってみた。このとき数値フィルター法での cut-off 周波数 f_c の設定方法が問題になるが、ここでは、線形理論による FLV 設置高さでの流速に対する表面波の伝達関数の形から、ほぼ 1 Hz 以上の波動成分の伝達率がゼロになることを考慮して、 $f_c=1\text{Hz}$ とした。そのようにして得られた乱れ強度 u' の経時変化を図-7(a) に示す。

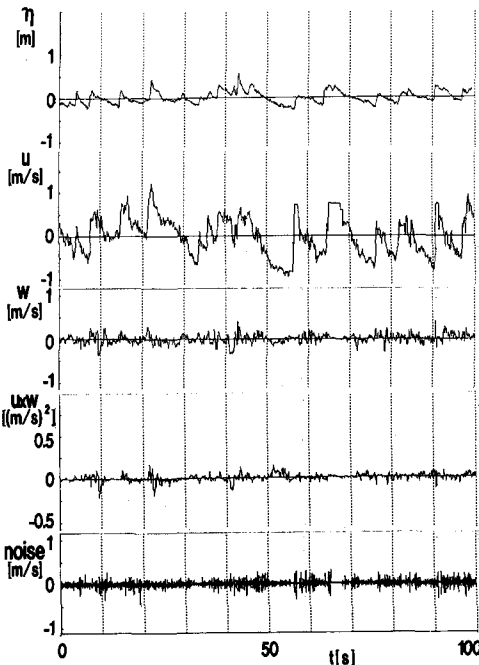


図-5 η , u , w , $u \times w$, および u の高周波成分 (run 5)

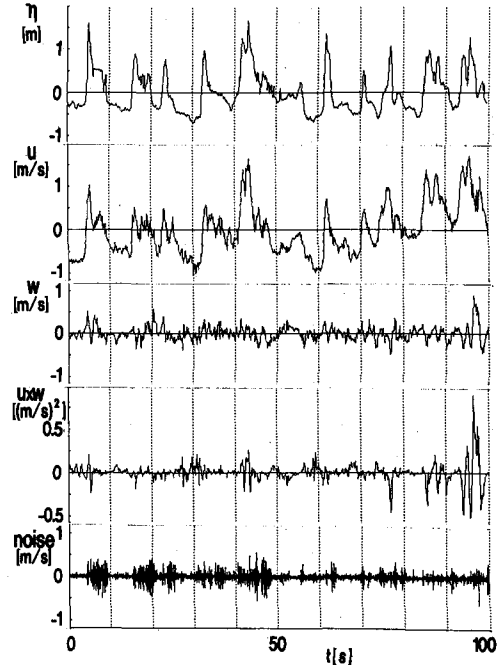


図-6 η , u , w , $u \times w$, および u の高周波成分 (run 13)

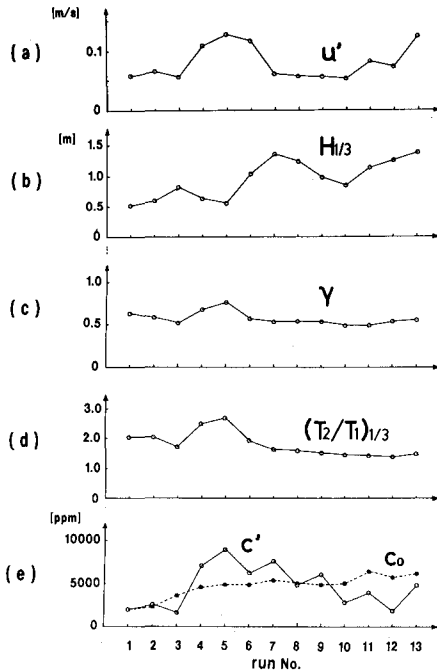


図-7 有義波高, 波高水深比, 前傾度, バックグランドレベル c_0 および変動成分レベル c' の経時変動パターン

一方, bore の水理特性量としてはここではまず有義波高 $H_{1/3}$ と波高水深比 γ を考えた。ここで, 波高水深比 γ は, 測定期間内の有義波高と平均水深の比で表した。図-7(b), 図-7(c) にそれらの値を示す。

まず, 乱れ強度 u' の経時変動パターンを見てみると, run 5 あたりと run 13 あわりに明瞭なピークが見られる。このうち, run 13 のピークは FLV の底面上の設置高さが他のケースよりかなり高かったことによるものと思われるが, run 5 あたりのピークは別の原因を考えなければならない。まず, 外力レベルを考える上で基本となる有義波高 $H_{1/3}$ との対応であるが, これはむしろ run 5 あたりで小さくなっていることがわかる。これに対して波高水深比 γ は, 逆に run 5 のあたりで増大しており, 乱れの底面付近への到達度には波高水深比 γ が深く関与していることがうかがえる。

さらに, bore の前傾度を表す指標として, 水位変動の zero-up 点から crest までの平均的時間 T_2 と, crest から zero-down 点までの平均的時間 T_1 の比, $(T_2/T_1)_{1/3}$ を算出した結果を図-7(d) に示す。

前傾度 $(T_2/T_1)_{1/3}$ の経時変動パターンも波高水深比と同様, run 5 あたりでピークを示すが, そのピークが波高水深比 γ よりも明瞭に示されている。したがって, 波高水深比 γ より前傾度 $(T_2/T_1)_{1/3}$ の方が乱れ強度 u' と密接した関係にあると思われる。このようなことから, bore の発達程度及びそれに伴う乱れの生成レベルが,

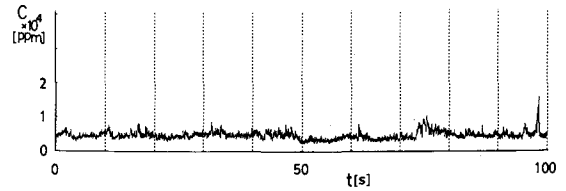


図-8 run 13 における c の生データ

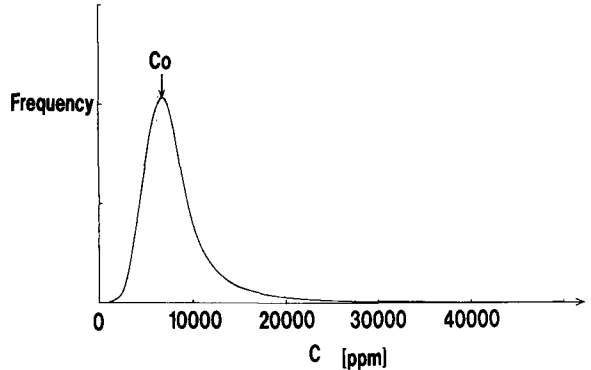


図-9 浮遊砂濃度のバックグランドレベル c_0 の定義

bore の前傾度によって大きく規定されることが明らかとなった。

(2) 濃度データの成分分離

浮遊砂に関する代表量の表し方に関しては多少注意する必要がある。というのは, 先の図-3 の例で示した浮遊砂濃度の生記録を注意深くみるとわかるように, 濃度の最低レベルが run が異なると必ずしも同じにならないからである。この最低濃度レベルは, いわば海水の透明度に対応したものと考えられ, その意味で以下ではこれをバックグランドレベルと呼ぶことにする。このバックグランドレベルの違いという点に留意して先の図-3 の記録例を見ると, run 5 ではバックグランドレベルは小さいけれども比較的高濃度の間欠的な濃度上昇が何度か生じているのに対し, 図-8 に示す run 13 ではバックグランドレベルはやや上昇しているもののそれからの間欠的な濃度上昇はほとんど見られないことがわかる。このことは, バックグランドレベルとそれからの間欠的な濃度上昇を支配しているファクターが必ずしも等しくないということを示唆している。したがって, 濃度データ情報の代表量の算出に当たっては, 何らかの方法でこの二つの成分を分離してやる必要がある。

成分分離を行うため, ここでは, 図-9 に示すような各 run の濃度記録 $c(n\Delta t)$ ($n=1, n_{\max}$) に対するヒストグラムを作成し, その最頻値としてバックグランドレベル c_0 を算出した。そして, c_0 からのずれを間欠的な浮遊砂濃度の変動分とし, その r. m. s. 値 c' を算出した。

(3) 乱れ強度・濃度レベルと外力条件との関係

図-7(e)は、上記の方法によって算出された乱れ強度 u' 、浮遊砂濃度のバックグランドレベル c_0 ならびにそれからの間欠変動成分レベル c' を示したものである。これから、成分分離された c_0 と c' は、互いに全く異なった経時変動パターンを示すことがわかる。これと、観測期間中の外力条件の変動パターンと比較してみると、バックグランドレベル c_0 は有義波高の変化にほぼ対応して変化するのに対して、間欠変動成分レベル c' は乱れ強度 u' ないしはそれに関連する bore の前傾度 $(T_2/T_1)_{1/3}$ に規定されて変化している。これは、バックグランドレベル c_0 が粒径の細かい wash load 的な成分による「海水の濁り」に対応し、それが底面での摩擦速度のレベルを規定する有義波高に依存するのに対し、後者の間欠変動成分レベル c' が bore の上層から底面に達する乱れに規定されていることによるものと考えられる。

5. おわりに

本研究では、現地用レーザ流速計と浮遊砂濃度計を使用し、広い範囲にわたる水理条件のもとで現地観測を行い、砕波による乱れと底質浮遊の関連性を明らかにした。その結果、bore に伴う乱れの生成や底質浮遊の支配要因として、bore の前傾度が重要な役割を果たしていることが明らかとなった。

謝辞：運輸省波崎海洋研究施設 (HORE) での現地計測にあたっては、港湾技術研究所漂砂研究施設の加藤室長をはじめとするスタッフの方々にさまざまな便宜を図って頂いた。ここに記して謝意を表します。

また、本研究は文部省科学研究費 (課題番号：63850118, 研究代表者：灘岡和夫) の補助を受けて行ったものである。

参 考 文 献

- 青野利夫・服部昌太郎 (1983): 砕波による乱れの空間特性に関する実験的研究, 第 30 回海岸工学講演論文集, pp. 25-29.
- 灘岡和夫・近藤隆道・田中則男 (1982): レーザードップラー流速計による砕波帯内の流速場の構造の解明, 港研報告, vol. 21, no. 2, pp. 49-106.
- 灘岡和夫・上野成三・五十嵐龍行 (1987a): 砕波帯内の三次元的大規模渦構造と浮遊砂の現地観測, 第 34 回海岸工学講演論文集, pp. 21-25.
- 灘岡和夫・上野成三・五十嵐龍行 (1987b): 砕波帯内における底面近傍の流体運動特性と浮遊砂について, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp. 256-260.
- 灘岡和夫・小谷野喜二・日野幹夫 (1985): 二成分光ファイバー流速計を用いた砕波帯内流速場の特性の解明, 第 32 回海岸工学講演会論文集, pp. 50-54.
- Battjes, J. A. (1988): Surf-zone dynamics, Ann. Rev. Fluid Mech., vol. 20, pp. 257-293.
- Peregrine, D. H. (1983): Breaking waves on beaches, Ann. Rev. Fluid Mech., vol. 15, pp. 149-178.