

斜め入射波による碎波帯内定常流の3次元分布

岡 安 章 夫*・ 原 幸 司**・ 柴 山 知 也***

1. はじめに

海岸付近における海浜流場の評価は、底質の移動や物質の拡散等を考える上で非常に重要である。近年、これらの問題に資するためにいくつかの海浜流場予測数値モデルが提案されており、漂砂量予測モデルと結び付けた海浜変形予測数値モデルも提案されている。しかし、これらの海浜流モデルの多くは鉛直方向に平均した流速を用いる平面2次元モデルであり、海浜流の鉛直分布については考慮されていない。特に局所的な漂砂量則を用いて底質移動を評価する場合には、底面付近での流速変動を予測する必要がある、これに対する戻り流れや底面境界層の影響を考えれば、鉛直分布が扱える3次元海浜流モデルを構築する必要がある。

海浜流の3次元分布に関しては、近年、主に理学的な興味から、解析的な研究とともにいくつか理論的なモデルが提案されている。De Vriend・Stive (1987) はこれまでの2DVモデルと2DHモデルから3次元モデルを提案し、海浜流場における戻り流れの重要性について指摘している。Svendsen・Lorenz (1989) は、3次元のレイノルズ方程式から岸沖・沿岸方向に関する定常流の方程式を導き、両者を別々に解いてベクトル的に合成する方法を提案している。Svendsen・Putrevu (1990) も同様な方法において、radiation stress、底面と波谷における剪断応力、岸沖方向の質量保存則等の境界条件から岸沖・沿岸流速を求め、これを合成して3次元海浜流分布としている。しかしながら、これらの研究においてはいずれも沿岸方向に場が変化しない海岸を仮定しているため、一般的な条件に対しては適用できない。

一方、沼野ら (1989) は、2次元の海浜流数値モデルの中に戻り流れの効果を加え、底質移動に対する戻り流れの影響について検討している。一般的な海浜流場の中では、沿岸方向に一樣な場で仮定できる岸沖方向の質量保存則が成り立たないので、これまでの鉛直2次元の戻り流れのモデルをそのまま適用できるかどうかは明らか

でない。

いずれにせよ今後3次元の海浜流モデルを論じる際には実測データとの比較が不可欠と考えられるが、鉛直分布を含めた海浜流については、これまで詳細に計測された例がほとんどなく、その分布特性については不明な点が多い。そこで、本研究では、平面実験水槽において沿岸方向に一樣な海底地形上で規則波を斜めに入射させ、碎波帯内岸沖・沿岸方向流速をファイバー・レーザ・ドプラ流速計 (日本カノマックス社製, 10 mW, He-Ne) で測定し、海浜流の3次元分布特性について検討した。また、得られた実験データと、波・流れの干渉を考慮した非定常緩勾配方程式を用いた波浪・海浜流モデルによる計算結果とを比較し、底面付近での実測定常流速と比較するとともに、波谷下における戻り流れの海浜流に対する影響について考察を加えた。

2. 実験方法およびデータ処理

2.1 実験条件と実験方法

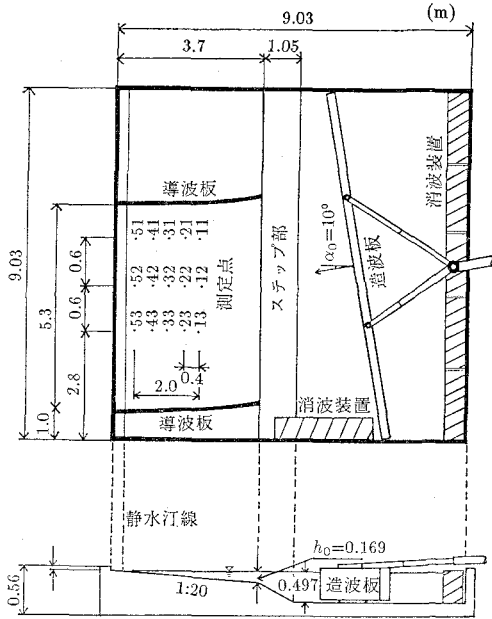
実験には、長さ、幅とも約9 m、深さ約0.55 mの平面水槽を用いた。この水槽の片側には造波角度を変えられる規則波造波装置が備えられており、反対側に沿岸方向に一樣な1/20勾配斜面をモルタルで作成し実験を行った。沖側一様水深部での水深を確保するため、斜面先端から1.05 mは1/3程度の勾配となっている。勾配斜面上には波向き線とほぼ一致するように水槽の左右にそれぞれ導波板を設置し、比較的単純で安定した海浜流パターンとなるようにした。実験に用いた平面水槽の概要を図-1に示す。

実験条件は、周期 T 1.33 s、碎波水深 h_b 約 7.5 cm、碎波波高 H_b 約 6.5 cm、入射波向角 α 10° の斜め入射規則波1ケースのみであり、沖側一様水深部での静水深 h_t は 49.7 cm であった。碎波点沖側から静水汀線付近までの岸沖・沿岸方向の流速変動をファイバー・レーザ・ドプラ流速計 (以下 FLV と略す) で測定し、別に容量式波高計により水位変動も記録した。流速測定は、沿岸方向に3点、岸沖方向に5点の3×5格子に計15の鉛直測線を設定し、それぞれの測線において底面上2 mm から鉛直方向に5~16点を配置した。測定点の総

* 正 会 員 工 博 横浜国立大学助手 工学部建設学科

** 学生会員 横浜国立大学大学院 工学研究科

*** 正 会 員 工 博 横浜国立大学助教授 工学部建設学科



図一 平面水槽の概要

数は約150で、波谷より上で波の位相により水面から露出する測定点においても可能な限りデータを取得した。水位変動も同様の測線において測定した。測線の番号および位置もあわせて図一に記載する。

2.2 データ処理と定常流速の算定

本実験で使用したFLVは流速成分のうち一方のみしか測定できないため、一つの測定点に対し流速測定を2度行い、岸沖・沿岸の2方向成分 u, v を測定した。また、この流速計は信号処理器がドップラ・シフトを検出した瞬間の流速とその時刻を記録するが、本実験においては毎秒50個程度の流速データ $u(x, y, z; t), v(x, y, z; t)$ が取得され、連続する10周期分を解析した。水位変動 η は流速とは別途に測定を行い、100周期分をサンプリング周波数20Hzでデジタル・データ・レコーダに記録し、以後の解析に用いた。

得られた岸沖・沿岸方向流速のデータから定常成分を計算し、水位変動記録から波高分布を求めた。岸沖・沿岸定常流速成分 $\bar{u}, \bar{v}$ は、前述の変動流速データ $u(x, y, z; t), v(x, y, z; t)$ を10周期にわたり数値積分し、測定時間で除することにより求めた。波谷より上の測定点については、0.1秒以上データが取得されなかった場合には、その間測定点は水面上にあったと考え、積分時に u (または v)=0として定常流速を計算した。

碎波帯内での波谷より上の領域では、水と空気の界面(水面)が存在することや、一般に気泡の混入量が多いため、流速測定が非常に困難であった。本実験で使用したレーザ流速計は後方散乱型で、焦点距離は約25mm、

レンズ面でのビーム間隔は5mm程度であるので、レンズ前方のこの領域内に水面もしくは相当量の気泡が混入していない限り、流速測定は可能であると考えられる。従って、上述の方法によって得られた定常流速にも、それほど大きな誤差はないと思われる。水位変動については、得られた100波分のデータについて1波毎に最大値、最小値を求め、これらの平均を波峰 η_{or} 、波谷 η_{tr} とした。平均水位 $\bar{\eta}$ は100周期分の水位変動データを平均して求めた。

3. 実験結果

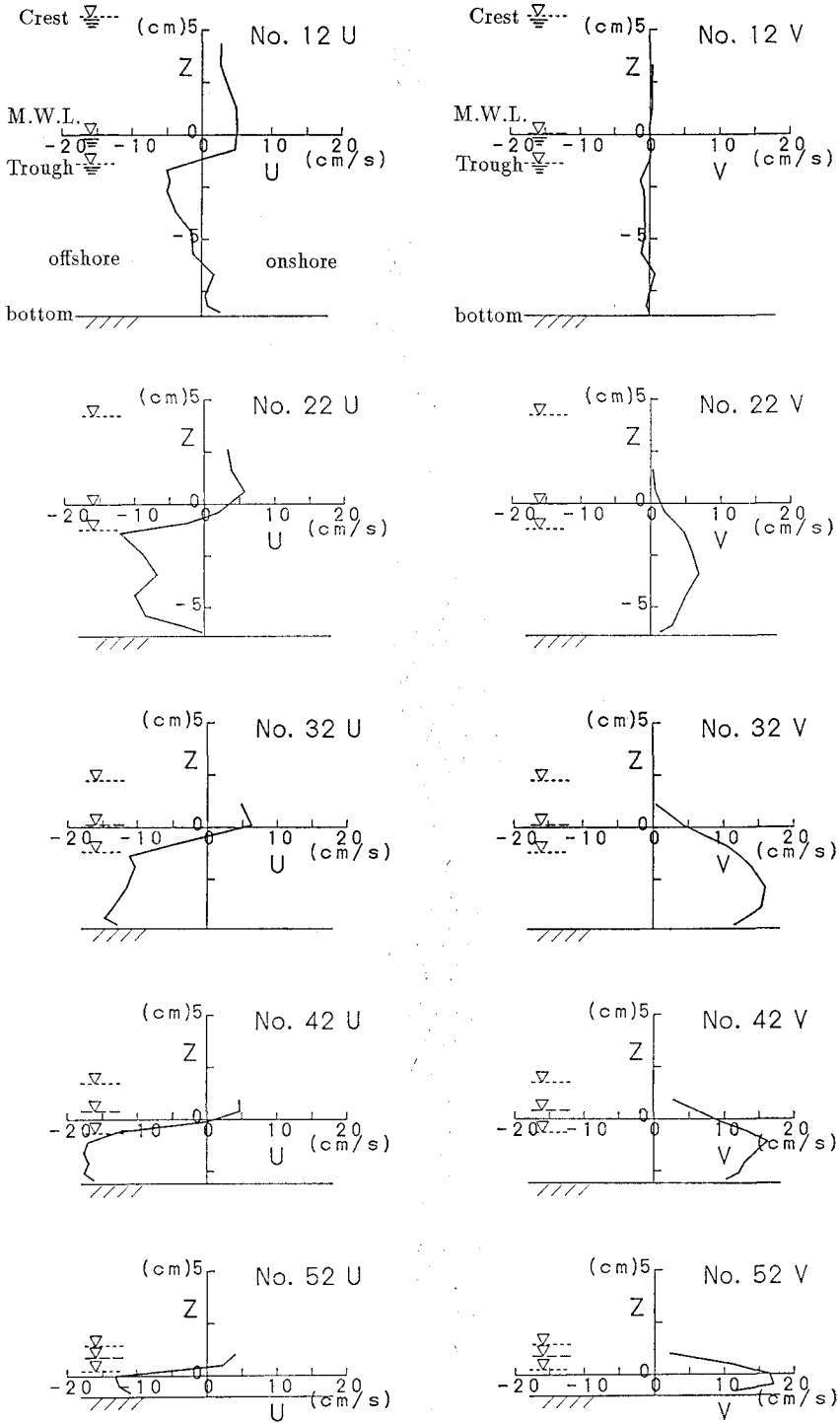
3.1 岸沖・沿岸方向定常流速の鉛直分布

図二は沿岸方向に3列ある測線のうちの中央部の測線に関して、碎波点直前の測線12から静水位汀線付近の測線52までの5本の測線での岸沖・沿岸定常流速 $\bar{u}, \bar{v}$ の鉛直方向分布を示したものである。岸沖定常流に関しては、碎波帯内外ともに2次元波動水槽で観察される戻り流れの鉛直分布(例えば岡安ら, 1987)に近い形状であり、ほぼ断面平均流速分だけ沖側もしくは岸側にシフトした形状となっている。モデルにおいて岸沖流の鉛直分布を決定する際に Svendsen・Putrevu (1990) は $\bar{u}$ に対する底面での境界条件を

$$\tau_b = \rho \nu_t \left. \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right|_{z=-h} = \frac{1}{2} \overline{af u_b |u_b|} \quad \dots\dots\dots (1)$$

(τ_b : 底面境界層外縁での剪断応力, ν_t : 渦動粘性係数, f : 底面摩擦係数, u_b : 境界層外縁での流速, z : 静水面を基準とした鉛直上向き座標, h : 静水深)で与えている。測定結果を見ると、測線12の底面近傍では $\bar{u}$ が正であり、(1)式右辺が正になる可能性が高いにもかかわらず、 $\frac{\partial \bar{u}}{\partial z}$ が負となっており、この境界条件の与え方には疑問がある。定常流に対する境界層を波動境界層と同一にすることには検討の余地があり、剪断応力もむしろ上方の場の影響を強く受けると考えるべきであろう。また、碎波帯内についても、Svendsen・Putrevuのモデルは一般に底面付近での速度欠損が小さいが、この点については剪断応力の評価の問題とともに渦動粘性係数を鉛直方向に一定とすることで底面付近の渦動粘性係数が過大に評価されているためではないかと考えられる。

沿岸方向の定常流に関しては、鉛直方向にほぼ一定の値であるが、底面付近では境界層の影響によるものと思われる速度欠損を示し、全体としてはより対数分布に似た形状となっている。波谷より上では、測定点が水面より露出したと判断された時間については流速値が積分されていないので、波谷より下の流速値より小さな値を示している。本研究での実験結果は Visser (1984) のほぼ直線分布と見なせる測定結果とは異なった形状を示して



cross-shore current

longshore current

図-2 各測線における岸沖・沿岸定常流速の鉛直分布

いるが、Visser については測定点が鉛直方向に3点しかないで、これ以上詳しい議論はできない。また、Svendsen・Lorenz (1989) のモデルによる分布形状もかなり直線に近い形状となっているが、これは沿岸方向微分の項を無視しているほかに、岸沖流と同様、底面付近での渦動粘性係数が過大に評価されているためと思われる。

3.2 3次元の海浜流分布形状

図-3(a) は砕波点直前の測線 13(図-1 参照) における海浜流の鉛直分布の例である。岸沖方向の定常流 $\bar{u}$ と沿岸方向の定常流 $\bar{v}$ の鉛直分布がそれぞれ点線で示されており、両者をベクトル的に合成したものが矢印と実線で示されている。岸沖・沿岸流それぞれに関しては、図-2 と同様な分布形状となっている。(b) は砕波帯中程の測線 42 における 3 次元分布である。この図では、流向の鉛直方向変化が著しく、海浜流が螺旋状にねじれて分布している様子が良くわかる。従って、特に鉛直方向に広く分布している物質の移流・拡散をモデル化するには、海浜流の 3 次元取扱いが不可欠であることがわかる。

岸沖・沿岸定常流の鉛直分布形状自体については、前

節でも論じたようにこれまでの鉛直 2 次元での研究結果と同様と考えられる。したがって、平面 2 次元での質量保存則を考慮すれば、海浜流の 3 次元分布は岸沖流と沿岸流とに分けて評価を行い、これを合成することにより推算することが可能であると考えられる。

4. 平面 2 次元モデルによる結果との比較

図-4(a) は平面上の 15 の測線の各々について、底面から波峰まで定常流速を鉛直方向に平均した平面 2 次元の海浜流場 (U, V),

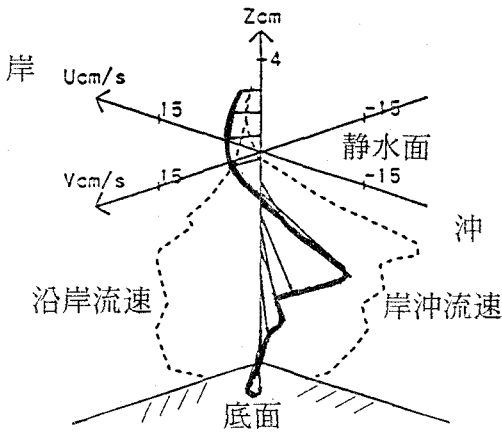
$$U = \frac{1}{\bar{\eta} + h} \int_{-h}^{\bar{\eta}} \frac{1}{T} \int_0^T u dt dz \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$V = \frac{1}{\bar{\eta} + h} \int_{-h}^{\bar{\eta}} \frac{1}{T} \int_0^T v dt dz \quad \dots\dots\dots (3)$$

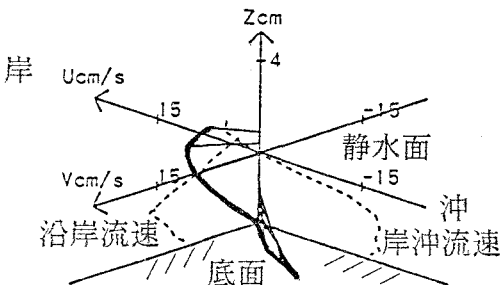
を示している。汀線に平行な面で考えた場合、測定結果は質量保存則を満たさず、全ての水深で総体として冲向きの質量輸送を示しているように見える。これは流速測定の精度、とくに波谷より上の測定点での平均流の精度に起因するものと思われる。しかし、沿岸方向に比較するとその値はかなり小さいので、2.2 節で述べたように波谷より上でも有意な流速が測定されていると判断できる。図-4(b) は底面上 5 mm の各測定点での $\bar{u}, \bar{v}$ の値、図-4(c) は波谷より下での鉛直平均流速の平面分布を図示したものである。図中、導波板は直線で描かれているが、実際は図-1 にあるように、ほぼ波向線に沿うように配置した。

一方、図-5 は本研究における実験とほぼ同様の条件での、波・流れの干渉を考慮した非定常緩勾配方程式を用いた平面 2 次元海浜流モデルによる計算値を示している。計算手法は大中・渡辺 (1989) による海浜流場の計算と同様に行い、海底地形は一様水深 +1/20 勾配、側方境界である導波板は 10° 傾いた直線の完全反射境界とした。入射波高は 6.0 cm とし、他の条件は実験と同じとした。計算値は、実測値 図-4(a) と比較して過小評価ではあるものの、図左上の小さな循環流を除けば全体の流況を良く再現している。過小評価の原因としては、砕波にとまなう質量輸送の海浜流への影響やこれにとまなう平均水位の上昇を無視していることが考えられる。図中左上の循環流については、これらの他に、側方境界の与え方も影響していると考えられる。

しかし、図-4(b) と比較した場合は、計算値が波峰、波谷間も含めて平均した流速を表示しており、上述のように砕波による波向方向への質量輸送も考慮されていないため、底面上 5 mm の点で観測される強い冲向き流れを表現できず、流速の絶対値についてもかなりの過小評価となっている。このことから、底質移動や物質拡散を評価するためには底面近傍の流速もしくは波谷下での流速が重要であるのに対し、現行の数値モデルでは十分に

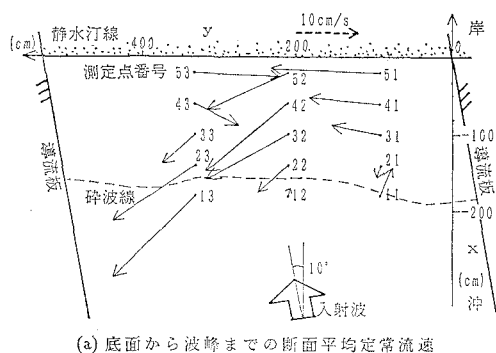


(a) 測線 13

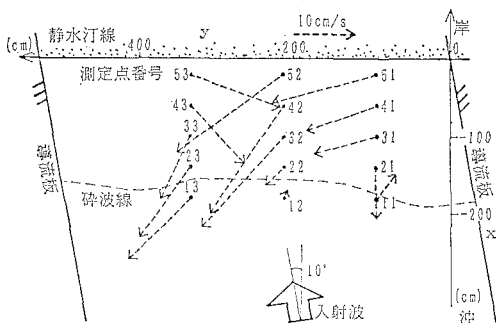


(b) 測線 42

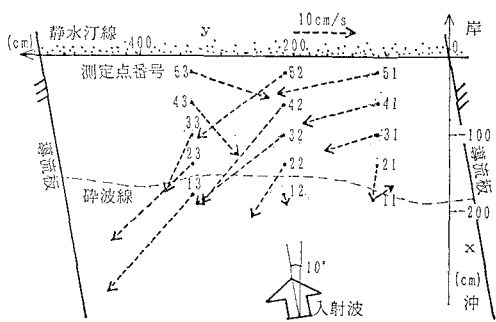
図-3 海浜流の 3 次元分布



(a) 底面から波峰までの断面平均定常流速



(b) 底面上 5 mm の測定点での定常流速



(c) 底面から波谷までの断面平均定常流速

図-4 海浜流の平面 2 次元分布の実測値

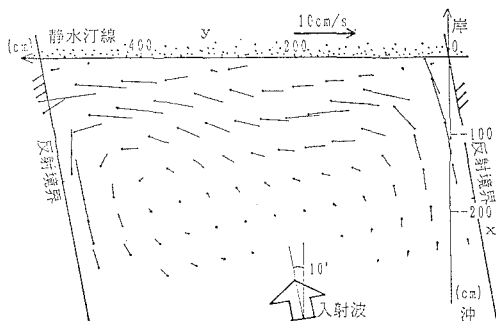


図-5 海浜流の平面 2 次元分布の計算値

精度の良い海浜流予測ができないことがわかる。ただし、図-4(b)と(c)を比較すると、底面付近の流速は波谷より下の平均流速とほぼ等しく、特に底面の近傍を対象とする底質移動モデル等への応用に関しては、上下層に分けた2層の海浜流モデルによってもある程度実用的な予測が可能と考えられる。

5. おわりに

本研究では、平面実験水槽に沿岸方向に一樣な海底地形を作成し、斜め入射規則波による碎波帯内岸沖・沿岸方向流速をファイバー・レーザ・ドブラー流速計で測定した。得られた海浜流の鉛直分布からその3次元分布特性について検討を加え、また、実験データと2次元平面での数値モデルによる結果とを比較し、以下の結論を得た。

1) 斜め入射波による碎波帯内の海浜流は、鉛直方向に流速・流向が大きく変化し、ねじれた螺旋状の分布となる。

2) 海浜流の岸沖方向成分は2次元波動水槽における戻り流れの分布に近く、沿岸方向についてはほぼ対数分布と考えられる。従って、海浜流の3次元分布は岸沖流と沿岸流とに分けて考え、これを合成することによりある程度評価が可能である。

3) 碎波帯内での海浜変形や物質拡散の評価にはこれまでの鉛直方向に平均した海浜流モデルでは不十分であり、少なくとも碎波による質量輸送と戻り流れを考慮すべきである。

参考文献

- 大中 晋・渡辺 晃(1989): 波・流れ相互干渉を考慮した波動場・海浜流場・地形変化の数値計算, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 399-403.
- 岡安章夫・柴山知也・堀川清司(1987): 碎波帯内定常流速場の鉛直分布に関する研究, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 31-35.
- 沼野祐二・佐藤慎司・柴山知也(1989): 海浜変形数値シミュレーションにおける浮遊砂の移流過程と undertow の効果, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 394-398.
- De Vriend, H. J. and M. J. F. Stive(1987): Quasi-3D modeling of nearshore currents, Coastal Eng., Vol. 11, pp. 565-601.
- Svendsen, I. A. and R. S. Lorenz(1989): Velocities in combined undertow and longshore currents, Coastal Eng., Vol. 13, pp. 55-79.
- Svendsen, I. A. and U. Putrevu(1990): Nearshore circulation with 3-D profiles, Proc. of 22nd Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 241-254.
- Visser, P. J.(1984): A mathematical model of uniform longshore currents and comparison with laboratory data, Communications on Hydraulics, Rep. 84-2, Dept. of Civil Eng., Delft Univ. of Tech., 151 p.