

沿岸流速分布の類型化と支配要因の検討

栗山善昭*・加藤一正**・尾崎 靖***

1. はじめに

沿岸流速分布は沿岸漂砂量の岸沖分布と密接にかかわる重要な問題であることから、数多くの予測モデルが提案され、その妥当性が検討されてきている。しかし、モデルの多さとは対照的に、現地における沿岸流速分布の観測例は驚くほど少なく、その実態はほとんど把握されていない。

そこで、本研究では、現地における沿岸流速分布の実態把握を目的として、4年間にわたって沿岸流を毎日測定し、得られた沿岸流速分布を類型化し、その発生頻度、支配要因を調べた。

2. 観測方法

1987年1月4日から1990年12月28日までの4年間、鹿島灘に面する全長 427 m の波崎海洋研究施設（以下 HORF、図-1 参照）に沿って1日1回、沿岸流速分布を観測した。図-2 は沿岸流速の測定地点を矢印で示したもので、測定地点の間隔は 15~30 m である。USW の表示のある地点では、超音波式波高計によって水面変動を1時間間隔で測定している。図-2 の下段は観測期間中の平均断面である。

観測では、図-3 に示す直径約 20 cm のフロートを使

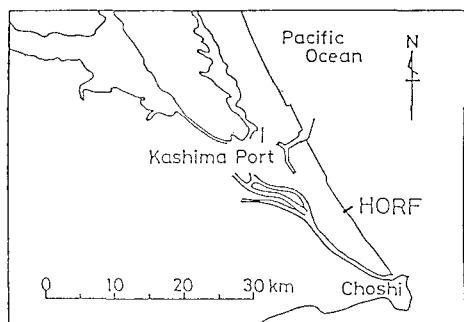


図-1 波崎海洋研究施設の位置

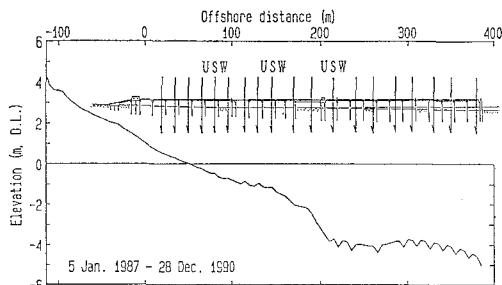


図-2 沿岸流速測定位置と平均断面

用した。波や風の影響を少なくするために、海面より約 1 m 下方の沿岸流速を測定するようにした。そのため、フロートの比重を海水よりやや大きくし、1 m のロープでフロートと目印ブイを結びつけた。

フロートを栈橋真下に投下してからフロートにくくりつけてある長さ 30 m のロープが張るまでの時間を測定することによって速さを求め、流向はフロートの流される方向を分度器で測った。1 地点において3回測定を行い、その平均値を沿岸流速とした。

HORF 先端から汀線位置近傍までの沿岸流速測定に要する時間は約90分で、砕波位置、砕波波高、周期、流向、砕波型式、汀線位置は目視で観測した。

フロートによる沿岸流速測定の精度を調べるために、P 145 m 地点においてフロートと電磁流速計で同時に沿

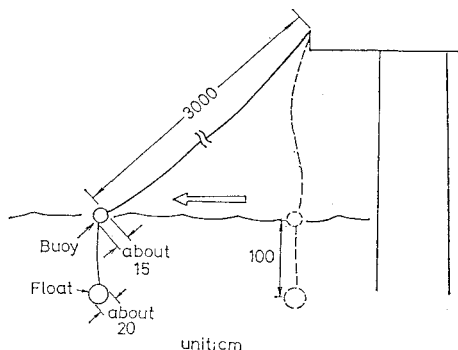


図-3 沿岸流速測定用フロート

* 正会員 運輸省港湾技術研究所 水工部 主任研究官
 ** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 漂砂研究室長
 *** 運輸省港湾技術研究所 漂砂研究室

岸流速を測定した。電磁流速計は D. L. 0 m に設置され、海面からの距離は 0.8~1.2 m であった。

図-4 はフロートによって測定した沿岸流速 U_{FLOAT} (沖を向いて右側を正とする) と電磁流速計によって測定した沿岸流速 U_{EMC} との相関を示したもので、図中の△印は、沿岸方向の風速が正の方向に 8 m/s 以上のケースを示している。両者の相関は非常に高く、風の影響がほとんど無いことから、本方法でかなり精度良く沿岸流速を測定できることがわかる。

両者の関係は、

$$U_{EMC} = 0.81 \cdot U_{FLOAT} \dots\dots\dots (1)$$

で近似でき、以下の解析では、この式を用いて変換した沿岸流速を用いる。

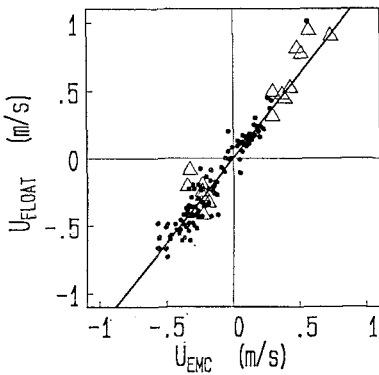


図-4 フロートによる沿岸流速測定法の検定結果

3. クラスタ分析による沿岸流速分布の類型化

砕波帯内の平均沿岸流速が 30 cm/s 以上の 162 ケースの沿岸流速分布を、クラスター分析によって類型化することを試みる。まず、沿岸流速 U を砕波帯内の平均沿岸流速 U_{mean} で無次元化した後、汀線からの距離 Y が砕波帯幅 Y_b の $0.1 \times$ 整数倍となる位置での流速値を内挿する。その値を変量として、個体間の非類似度をユークリッド平方距離で定義し、群平均法によるクラスター分析を行った。

図-5 は、そのようにして 4 つに分類された沿岸流速分布の各パターンにおける平均の形状と発生頻度を示したものである。矢印は最大流速の発生位置を、細線は標準偏差を示している。パターン 1 からパターン 4 へ移るにつれて無次元最大流速の発生位置が砕波位置に近づき、砕波位置での無次元沿岸流速が大きくなる。汀線より $0.6 \sim 0.8 Y_b$ の位置で $1.2 \sim 1.4 U_{mean}$ の最大流速が生ずるパターン 2 とパターン 3 の発生頻度が全体の約 85% であった。

合田・渡辺 (1990) の数値計算を基にすると、一様勾

配斜面での最大沿岸流速の発生位置 Y_{mode}/Y_b は約 0.55 である。この値に比べると、パターン 3 およびパターン 4 における最大沿岸流速発生位置は砕波位置に近い。この原因は、4. (2) で検討する。

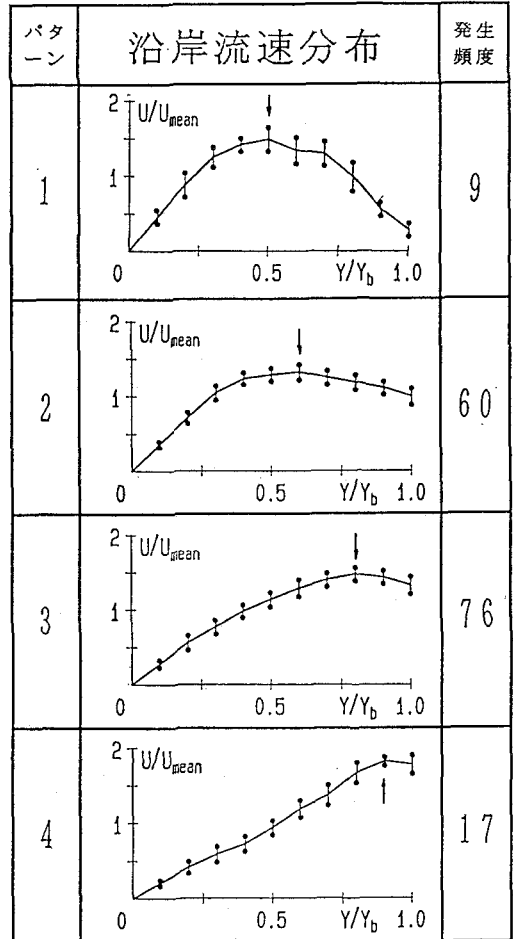


図-5 各パターンにおける平均の沿岸流速分布

4. 沿岸流速分布に影響を及ぼす支配要因の検討

(1) 沿岸流速分布に及ぼす水平拡散の影響

沿岸流速は沿岸方向の運動量の釣り合い式から求められる。沿岸方向の運動量の釣り合いには、通常、radiation stress の勾配項、底面摩擦応力項、水平拡散項が含まれるけれども、不規則波の場合には水平拡散項を考慮しなくとも砕波帯内の沿岸流速分布を十分な精度で求めることが示されている (Thornton・Guza, 1986; 合田・渡辺, 1990)。そこで、本節では、沿岸方向の運動量の釣り合い式において水平拡散を考慮する場合としない場合とを比較することにより、沿岸流速分布に及ぼす水平拡散の影響を検討する。

沖を向いて右側に x 軸の正の方向を、沖向きに y 軸の正の方向を設定し、波向を HOF 沖からゼロ、反時計回りに正と定義すると、水平拡散を考慮した沿岸方向の運動量の釣り合いは以下の式となる。

$$-\frac{dS_{yx}}{dy} = -\tau_b + \frac{dR_{yx}}{dy} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 S_{yx} は radiation stress, τ_b は摩擦応力, R_{yx} はレイノルズ応力で、 S_{yx} は式 (3) で求めることができる。

$$S_{yx} = nE \sin(-2\alpha)/2 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 n は群速度と波速との比、 E は波のエネルギー、 α は波向である。

ここで、式 (2) の左辺の radiation stress 勾配と釣り合う力として、摩擦応力のみを考慮するモデルと摩擦応力とレイノルズ応力勾配の両方を考慮するモデルを考え、両者の優劣を比較することによって、沿岸流速分布に及ぼす水平拡散の影響を検討する。

摩擦応力として Longuet-Higgins (1970) によって提案された線形の摩擦応力式 (4) と西村 (1981) によって提案された非線形の摩擦応力式 (5) とを考える。

$$\tau_b = -(2/\pi)\rho C_f v_{max} U \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\tau_b = -\rho C_f \left(Z_1 + \frac{Z_2^2}{Z_1} \sin^2 \alpha \right) U, \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$Z_1 = (\sqrt{U^2 + Z_2^2} + 2Z_2 U \sin \alpha) \\ + \sqrt{U^2 + Z_2^2} - 2Z_2 U \sin \alpha / 2,$$

$$Z_2 = (2/\pi) v_{max}$$

ただし、 ρ は海水の密度、 C_f は係数、 v_{max} は底面における水粒子最大速度、 U は沿岸流速である。

レイノルズ応力としては Longuet-Higgins (1970) によって提案された式 (6) と Battjes (1975) によって提案された式 (7) とを考える。

$$R_{yx} = -h\rho NY \sqrt{gh} (dU/dy) \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$R_{yx} = -h\rho M (5\gamma^2/16)^{1/3} \\ \times (\tan \beta)^{4/3} Y \sqrt{gh} (dU/dy) \quad \dots\dots\dots (7)$$

ただし、 h は水深、 Y は汀線からの距離、 γ は波高水深比、 $\tan \beta$ は海底勾配、 N, M は係数である。

計算対象領域として隣合う超音波式波高計にはさまれた領域 (図-2 参照) を考える。計算対象領域の幅は 70 m で、碎波帯幅 (110~210 m) の 1/3~2/3 倍である。

Radiation stress の勾配やレイノルズ応力の勾配は沖側境界、岸側境界での値の差として求める。ただし、radiation stress を計算する際の波向はスネルの法則を用いて碎波波向から求め、波のエネルギーは波高の自乗平均値を用いて計算する。沿岸流速の勾配及び海底勾配は、それぞれ連続する3点間、5点間の平均勾配として求める。

摩擦応力は、沿岸流速測定地点ごとに計算して計算対象領域内の平均の摩擦応力を算出する。沿岸流速測定地点における底面での最大水平粒子速度は、超音波式波高計の記録から内挿して求めた平均波高、1/3 有義波周期から計算する。

Thornton・Guza (1981) によると、波向が小さい場合には、電磁流速計を使ったとしても浅海域で測定された波向を基に radiation stress を計算すると、波高の誤差が radiation stress に大きく影響するため正確に radiation stress を計算できない。そこで、本計算では、碎波波向が 15° 以上のデータのみを用いる。

摩擦応力とレイノルズ応力の係数は、最小自乗法によって決定する。モデルの優劣を判断する基準としては、赤池の情報量基準 (AIC) (坂元ほか, 1983) を用いる。AIC が小さいほどモデルの精度が良く、AIC の差が2以上であれば有意な差と考えることができる (坂元ほか, 1983)。

表-1 は、各モデルの係数の値と AIC の値とを示したものである。AIC の比較からわかるように、摩擦応力として式 (4) を使った場合には、レイノルズ応力を考慮したモデルと考慮しないモデルとの優劣の差はほとんど無い。

表-1 各モデルにおける係数の値と AIC

摩擦応力	レイノルズ応力	C_f	N	M	AIC
式(4)	—	0.0103	—	—	-316.9
式(4)	式(6)	0.0102	0.00047	—	-315.1
式(4)	式(7)	0.0099	—	0.24	-316.1
式(5)	—	0.0045	—	—	-306.5
式(5)	式(6)	0.0044	0.00099	—	-305.2
式(5)	式(7)	0.0043	—	0.35	-306.7

図-6 (1) は、摩擦応力と radiation stress の勾配とを比較したもので、図-6 (2) は摩擦応力とレイノルズ応力勾配の和と radiation stress の勾配とを比較したものである。レイノルズ応力を考慮しなくとも摩擦応力だけで radiation stress の勾配と十分な精度で釣り合うことがわかる。

この結果は碎波帯幅の 1/3~2/3 倍の範囲での平均量の釣り合いに関するものである。しかし、碎波帯内に比べて水平拡散の影響が大きいであろう碎波帯外でもレイノルズ応力を考慮せずに沿岸方向の運動量の釣り合いを考慮することができるということは、沿岸流速分布の計算では水平拡散を考慮しなくともよいことを示していると考えられる。

この結論は、現地観測結果を基にした Thornton・Guza (1986) の検討結果や合田・渡辺 (1990) の数値計算による検討結果と一致する。

摩擦応力の係数は Thornton・Guza (1986) によって実測値を基に求められた値 0.009 にほぼ等しく、レイノルズ応力の係数 N は彼らの値 0.002 よりもやや小さいもののそれほど大きな差はないと考えられる。式 (7) における係数 M は Battjes (1975) の示した値とオーダー的に一致した。

摩擦応力として式 (5) を用いた場合にも、摩擦応力のみのモデルとレイノルズ応力の勾配も考慮したモデルとの優劣の差はなかった。ただし、線形である式 (4) を使ったモデルも精度が悪かった。

なお、風による応力の項を加えての検討も行っただけども、沿岸方向の運動量の釣り合いには風の応力は全く影響しなかった。

(2) 各パターン発生時の波浪特性・地形特性

図-7 (1) は、各パターン発生時の碎波波高、碎波周期、碎波波向の頻度分布を示したもので、図-7 (2)

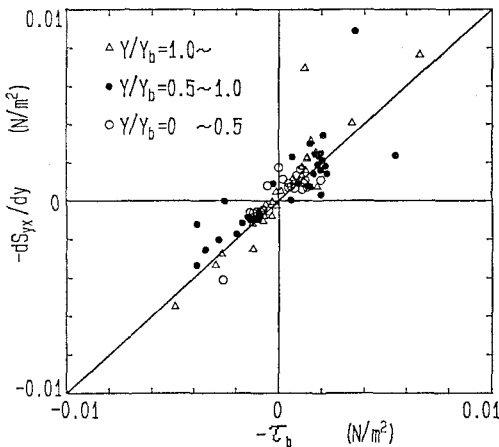


図-6(1) 摩擦応力と radiation stress 勾配との比較

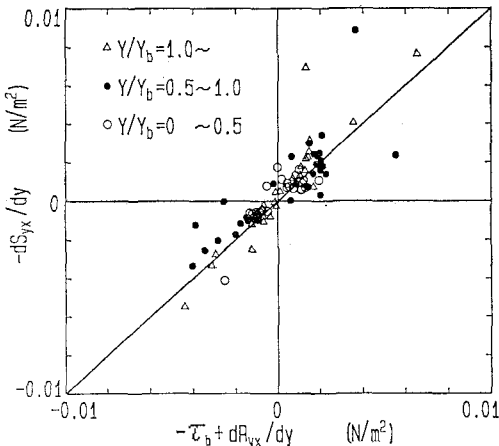


図-6(2) 摩擦応力とレイノルズ応力勾配の和と radiation stress 勾配との比較

は、碎波帯内の平均海底勾配、碎波位置から 50 m 沖までの平均海底勾配、碎波位置での波高水深比の頻度分布を示したものである。矢印とその横の数字は、各特性値の平均値を示している。

パターン 1 からパターン 4 へ移るにつれて、碎波位置より沖の海底勾配、碎波位置における波高水深比が大きくなる傾向がある。他の特性値である碎波波高、碎波周期、碎波波向や碎波帯内の海底勾配は、パターン 1 で他と異なる値となっているものの、パターン 2 からパターン 4 ではほぼ同じ値となっている。

3. で示したように、パターン 3 およびパターン 4 における最大沿岸流速発生位置は一樣勾配斜面での最大沿岸流速の発生位置 ($Y_{mode}/Y_b=0.55$) に比べて碎波位置に近い。この原因を、海底勾配、波高水深比との関係で検討する。

パターン 2 からパターン 4 では、碎波帯内の平均海底勾配は各パターンともに約 0.015 で、碎波位置近傍から沖に海底勾配が急になる。波が急勾配な領域から緩勾配の領域に進行すると急勾配で碎波していない波が勾配の変化する地点で碎波限界に達し急激な碎波、及び波高減衰が生ずる (高山ら, 1987)。勾配が変化する地点での波高減衰は沖の海底勾配が急であるほど激しいと考えられる。沿岸流速は radiation stress の勾配、すなわち波高減衰に比例することから、碎波位置近傍での波高減衰が大きいくほど、それに引っ張られて最大流速の発生位置が碎波位置に近づいたと考えられる。

碎波位置での波高水深比に関しても同様で、波高水深比が大きい場合ほど、碎波位置でより多くの波が碎波し、著しい碎波減衰が生じ、よって、最大流速の発生位置が碎波位置に近づいたと考えられる。

5. おわりに

本論文では、

①沿岸流速分布を 4 つのパターンに分類したところ、汀線より $0.6 \sim 0.8 Y_b$ の位置で $1.2 \sim 1.4 U_{mean}$ の最大流速の生ずるパターンの発生頻度が全体の約 85% であったこと、

②沿岸流速分布に対しては底面摩擦が支配的で、水平拡散はほとんど影響しないと考えられること、

③碎波位置より沖での海底勾配が急で、碎波位置での波高水深比が大きいほど最大沿岸流速の発生位置が碎波位置に近かったこと、これは、海底勾配が急なほど、波高水深比が大きいほど碎波位置近傍で激しい波高減衰が生じ、radiation stress の勾配が大きくなるためと考えられること、

を明らかにした。

最後に、現地観測を手伝ってくださった当所 漂砂研

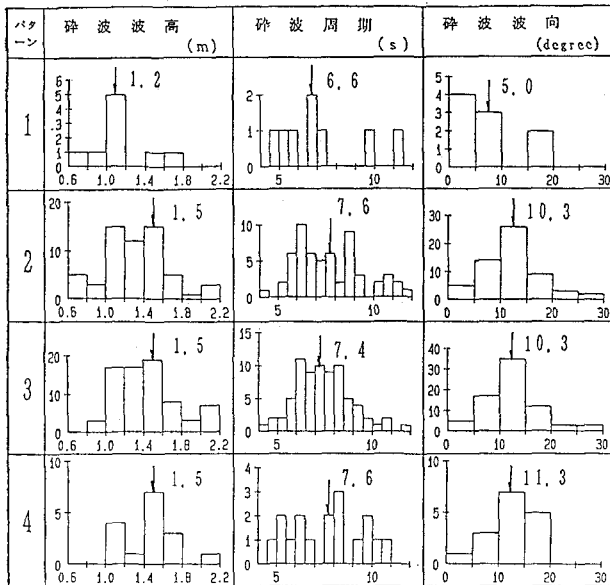


図-7(1) 各パターン発生時の波浪特性値の頻度分布

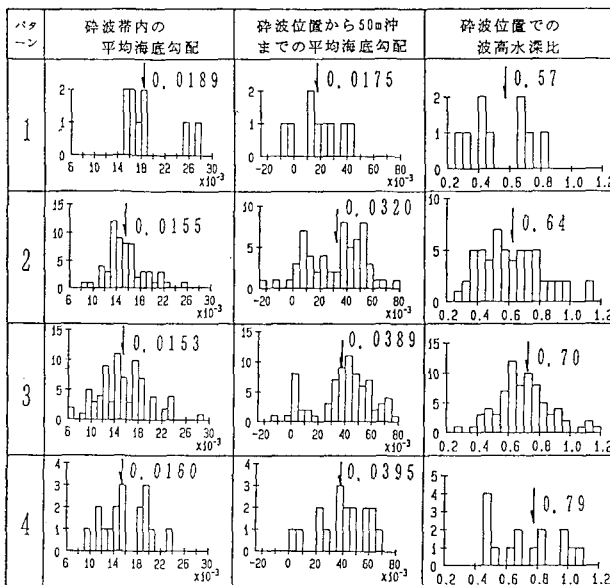


図-7(2) 各パターン発生時の地形特性値・波浪特性値の頻度分布

研究室のメンバー、ならびに(株)エコーの観測補助員の方々に感謝の意を表します。

参考文献

- 合田良実・渡辺則行 (1990): 沿岸流速公式への不規則波モデルの導入について, 海岸論文集, 第37巻, pp. 210-214.
- 坂元慶行・石黒真木夫・北川源四郎 (1983): 情報量統計学, 共立出版会, pp. 42-64.
- 高山知司・古川正美・立石義博 (1987): 複断面海岸における護岸越波流量に関する模型実験, 技研資料, No. 592, 30 p.
- 西村仁嗣 (1981): 岩石海岸モデル (I), NERC Rep. No. 14, TR-80-1, 海岸環境工学研究センター, pp. 140-147.
- Battjes, J. A. (1975): Modeling of turbulence in the surf zone, Proc. of Symp. on Modeling Techniques, ASCE, pp. 1050-1061.
- Longuet-Higgins, M. S. (1970): Longshore current generated by obliquely incident waves, 1 & 2, J. Geophys. Res., Vol. 75, No. 33, pp. 6778-6801.
- Thornton, E. B. and R. T. Guza (1981): Longshore currents and bed shear stress, Proc. Conf. on Directional Wave Spectra Applications, ASCE, pp. 147-164.
- Thornton, E. B. and R. T. Guza (1986): Surf zone longshore currents and random waves: Field data and models, J. Phys. Oceanogr., Vol. 16, No. 7, pp. 1165-1178.