

# FAVOR法を用いた海浜流モデルの開発と 海浜流場に与える計算格子と渦動粘性係数の 影響に関する一考察

NEARSHORE CURRENT MODEL USING FAVOR METHOD AND INFULENCE  
OF GRID SIZE AND EDDY VISCOSITY ON NEARSHORE CURRENT FIELD

黒岩正光<sup>1</sup>・高田哲志<sup>2</sup>・松原雄平<sup>3</sup>

Masamitsu KUROIWA, Testushi TAKADA and Yuhei MATSUBARA,

<sup>1</sup>正会員 博(工) 鳥取大学大学院准教授 工学研究科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

<sup>2</sup>鳥取大学大学院 工学研究科 博士前期課程 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

<sup>3</sup>正会員 博(工) 鳥取大学大学院教授 工学研究科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

This paper is concerned with a numerical model for calculating nearshore current field bounded by complicated geometric shapes, based on FAVOR method (Fractional Area/Volume Obstacle Representation Method). The finite difference method adapting the FAVOR method was employed. Firstly, the presented model was applied to nearshore current fields around a coastal structure, river mouth and cusps bathymetry. Secondly, the influences of the eddy viscosity coefficients and the grid size in the finite difference scheme on rip-current field generated on cusp shape bathymetries were examined. From the computed results, it was confirmed that the presented model adapting the FAVOR method is useful to predict nearshore current field in the vicinity of the complicated geometric shapes.

**Key Words :** Nearshore currents, numerical model, FAVOR method, eddy viscosity

## 1. はじめに

一般に、海浜流場計算モデルは3次元の海浜変形予測モデルの一部として適用されている。海浜変形モデルの計算の流れにおいて、波浪場計算においては、多くの実験結果や現地観測結果との比較がなされ、適用性については検証されている。しかしながら、海浜流場の場合、実測例が少なく、その精度は十分に検証されているとはいいがたい。3次元海浜変形計算モデルにおける1つのネックは海浜流場の計算にあり、特に、黒岩ら<sup>1)</sup>のように、汀線変化まで計算する場合、汀線付近の海浜流場の計算精度が重要となる。海浜流場の計算において汀線付近の極めて浅いところでは、どの程度までの深さを固定境界とすれば精度良い計算結果が得られるか、特に基準はなく、その取り扱いが明らかではない。また、数値計算の多くはデカルト座標系が用いられ、座標軸に対して汀線や構造物の接線方向が傾きを持つ場合、境界は階段状の表現となる。境界接線方向が座標軸に対して傾きを持つ場合は、曲線座標に変換する一般座標系が適用される場合があるが、基礎式の座標変換が伴い、黒岩ら<sup>1)</sup>のような汀線を移動境界として取り扱う場合、定式化とコーディングが複雑

となり労力がかかる。このような、複雑な固定境界や移動境界を有する場合、1つの有効な手法として Hirt・Sicilian<sup>2)</sup>は、FAVOR法 (Fractional Area/Volume Obstacle Representation Method) が提案されている。この手法は、正方格子をそのまま適用することができ、なおかつ複雑な地形や構造物の形状の影響を考慮できるもので、基礎的に定式化とコーディングが比較的容易である。梶川・檜谷<sup>3)</sup>は湾曲水路における局所流の3次元流れの解析に適用し、米山ら<sup>4)</sup>は津波遡上に伴う漂流物挙動に適用している。

海浜流モデルは、離岸流解析・予測になども利用されているが、離岸流計算においては、カスプ地形周辺や沿岸砂州周辺の循環流場の再現計算精度が重要であり、海浜流モデルにおける各種パラメータの選定方法を考える必要がある。カスプ地形上における離岸流計算においては、カスプのスケールに対して格子の大きさなども考慮する必要がある。

本研究では、FAVOR法を導入した海浜流モデルを構築すること、さらに、計算格子の大きさや離岸流などの計算における渦動粘性係数の与え方などについて数値実験的に検討することを目的とする。

## 2. 数値モデルの概要

本モデルは、波浪場と海浜流場との相互干渉は考慮せず、波浪場を求めた後、ラディエーションストレス項を付加した平面2次元の浅水方程式を用いて海浜流場を求めるものである。

### (1) 波浪場

波浪場は間瀬ら<sup>5)</sup>の多方向不規則波のエネルギー平衡方程式を適用し、JONSWAP型周波数スペクトルと光易型方向スペクトルの多方向不規則波として計算する。

### (2) FAVOR法を用いた海浜流モデル

Hirt・Sicilian<sup>2)</sup>によるFAVOR法は、複雑な境界上の流れにおいて格子中に流体部分と境界部分が混在すると考え、断面を通過する流体の割合は断面積率を乗じたものとなり、格子内における体積量は体積率を乗じたもので表される。本研究では、断面平均された平面的な取り扱いとして、図-1(b)に示す格子長率 $l_x, l_y$ と面積率 $A_z$ を用いて表した運動方程式を適用する。 $x$ および $y$ 方向の運動方程式はそれぞれ

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{1}{A_z} U \frac{\partial l_x U}{\partial x} + \frac{1}{A_z} V \frac{\partial l_y U}{\partial y} = -g \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x} - \frac{1}{A_z} \frac{1}{\bar{\eta} + h} \left\{ \frac{\partial l_x S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial l_y S_{xy}}{\partial y} \right\} + \frac{1}{A_z} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left( l_x v_e \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( l_y v_e \frac{\partial U}{\partial y} \right) - F_x \right\} \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{A_z} U \frac{\partial l_x V}{\partial x} + \frac{1}{A_z} V \frac{\partial l_y V}{\partial y} = -g \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial y} - \frac{1}{A_z} \frac{1}{\bar{\eta} + h} \left\{ \frac{\partial l_x S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial l_y S_{yy}}{\partial y} \right\} + \frac{1}{A_z} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left( l_x v_e \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( l_y v_e \frac{\partial V}{\partial y} \right) - F_y \right\} \quad (2)$$

で表される。ここに、 $U$ と $V$ は断面平均流速、 $g$ は重力加速度、 $\bar{\eta}$ は平均水位、 $S_{xx}, S_{yx}, S_{xy}, S_{yy}$ はラディエーションストレス、 $v_e$ は渦動粘性係数、 $F_x$ と $F_y$ は底面摩擦項である。 $A_z$ は平面における面積率、 $l_x, l_y$ は格子長率で、それぞれ0から1の間の無次元量である。連続式は

$$\frac{\partial \bar{\eta}}{\partial t} + \frac{1}{A_z} \left( \frac{\partial l_x (\bar{\eta} + h) U}{\partial x} + \frac{\partial l_y (\bar{\eta} + h) V}{\partial y} \right) = 0 \quad (3)$$

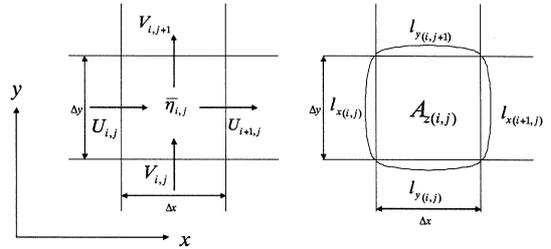
で表される。

式(1)~(3)に有限差分法を適用し、離散化における各変数は、図-1(a)に示すスタッガード格子に基づいて配置した。なお、汀線近傍における計算は、計算の安定性を考慮してある限界値(最小水深 $h_{\min}=0.2\text{m}$ )を定義した。境界における面積率 $A_z$ と格子長率 $l_x, l_y$ の設定例を図-1(c)に示す。

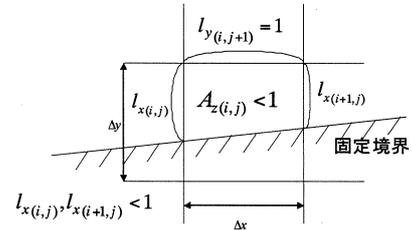
## 3. FAVOR法を用いた海浜流場の計算例

本章では、構造物周辺、河口付近およびカस्प地形周辺の海浜流場の計算を試みた。渦動粘性係数は後述するM2Dモデル<sup>6)</sup>を適用した。

図-2および図-3それぞれ構造物周辺および河口域周辺の海浜流場の計算結果を示したもので、各図中の(a)はFAVOR法適用有り、(b)は適用無しの結果である。波浪条件は図題に示すとおりで、 $\theta$ は主波向( $S_{\max}=75$ )を表す。これらの図から構造物近傍、河道内の側壁近傍の流速ベクトルが壁面に沿って滑らかな分布になっている。



(a) 変数の定義位置 (b) 面積率と格子長率



(c) 境界における面積率と格子長率

図-1 計算における変数の定義位置と平面における面積率と格子長率

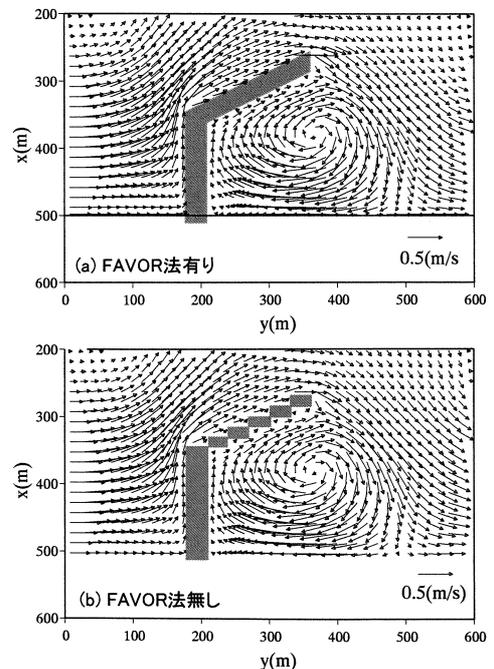


図-2 構造物周辺の海浜流場計算例 ( $H_{1/3}=2.0\text{m}, T_{1/3}=5.0\text{s}, \theta=20^\circ$ )

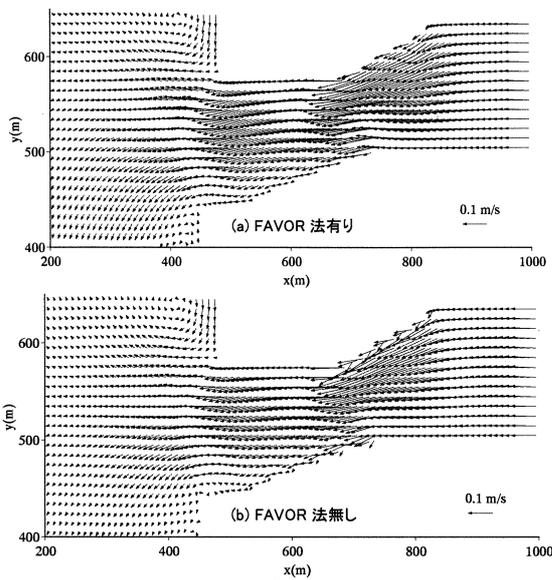


図-3 河口付近の河川流と海浜流場の計算例  
 $(H_{1/3}=1.0\text{m}, T_{1/3}=7.0\text{s}, \theta=0^\circ)$

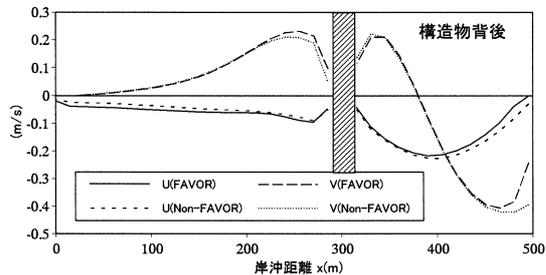


図-4 構造物前面および背後の流速分布

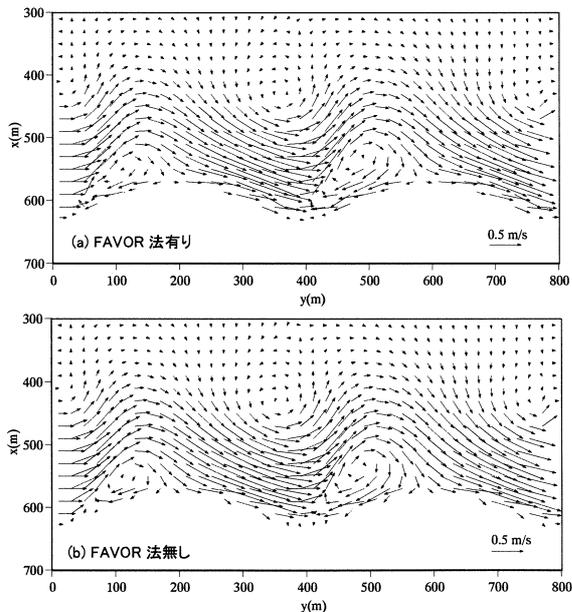


図-5 カस्प地形上の海浜流場の計算例  
 $(H_{1/3}=1.5\text{m}, T_{1/3}=7.0\text{s}, \theta=20^\circ)$

図-4 は図-2 の結果における沿岸方向 300m の位置における岸沖および沿岸方向流速の岸沖分布の比

較をしたもので、FAVOR 法を適用有りとなしとの流速分布形状の大きな相違はないが、流速の値が異なり、境界の影響がある範囲まで及ぶことが明らかである。

次に、カस्प地形に適用した例を図-5 に示す。カस्प地形における FAVOR 法適用と適用無しの場合の流速分布を比較したものである。全体的に海浜流場のパターンについては、顕著な違いは認められないが、汀線付近において、流速ベクトルの大きさと向きが異なっていることが明らかである。図-6 は流速分布を詳細に比較したもので、構造物の場合と同様に、流速分布の形状については大きな違いはないが、流速値が異なっている。

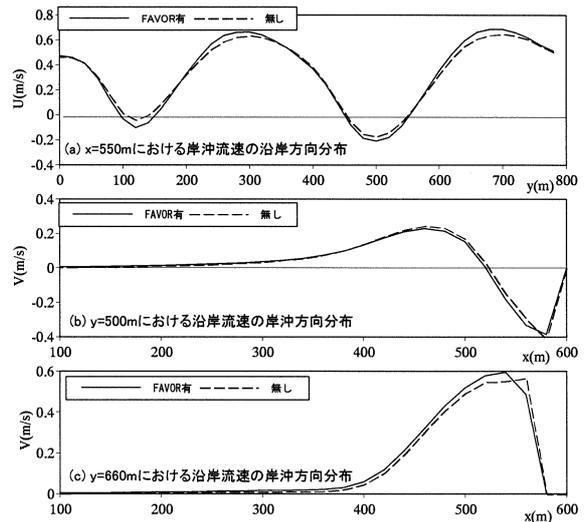


図-6 FAVOR 法有りとなしとの計算結果の比較

#### 4. 渦動粘性係数と計算格子が海浜流場に与える影響に関する一考察

##### (1) 渦動粘性係数( $\nu_e$ )

一般に、流れ場における乱れの効果は渦動粘性係数に集約され、海浜流場の計算においては、ゼロ方程式系のモデルが多く提案されている。基準となるモデルは無く、渦動粘性係数の与え方について詳細な議論はあまりなく、合田<sup>7)</sup>が沿岸流に対して渦動粘性係数の影響を検討している程度である。近年、離岸流に関する研究が多く見られるが、予測計算においては、その渦動粘性係数は重要なパラメータと考えられる。本研究では、これまで提案された代表的なモデルを用いて、渦動粘性係数が離岸流場に与える影響について検討した。まず、以下に本計算で用いたモデルを示しておく。

##### a) Longuet-Higgins モデル(LH)<sup>8)</sup>

拡散の長さが汀線からの距離  $x'$  に比例するとし

$$\nu_e = N_L \sqrt{g(h + \bar{\eta})} x' \quad (4)$$

で与えられる。ここに、 $N_L$ は無次元係数で、西村ら<sup>9)</sup>は0.01程度の値を、Deguchiら<sup>10)</sup>も、離岸流の計算に対して、 $N_L$ を0.01と設定している。LHモデルは古くから良く用いられているもので、係数 $N_L=0.01$ 程度の値が一般的のようである。

b) Battjes モデル (Bt)<sup>11)</sup>

砕波の影響を考慮したもので

$$v_e = N_B (D_b / \rho)^{1/3} h \quad (5)$$

で表される。ここに、 $D_b$ は砕波によるエネルギー逸散率である。 $D_b$ は得られた波高分布を用いてDallyら<sup>12)</sup>のモデルで計算した。 $N_B$ は無次元係数で、例えば、Pechonら<sup>13)</sup>は離岸堤周辺の海浜流場計算に対し0.4とし、Reinersら<sup>14)</sup>は沿岸砂州周辺の海浜流(離岸流)場に対して1.0の値を用いている。

c) Larson・Krous モデル (LK)<sup>15)</sup>

底面の水粒子速度 $u_b$ と波高 $H$ を用いて

$$v_e = N_{LK} u_b H \quad (6)$$

で表される。 $N_{LK}$ は無次元係数で、現地観測結果に対して0.3~0.5程度の値を設定している。

d) US-Army モデル (M2D)<sup>6)</sup>

波だけでなく、流れの効果も考慮したもので、Larson and Krous (式(7))に流れによる効果を付加している。

$$v_e = (1 - \alpha)v_c + \alpha v_w \quad (7)$$

ここに、 $v_w$ は波による効果であり、式(7)を用いている。 $v_c$ および $\alpha$ は、流れによる渦動粘性係数、 $\alpha$ は重みパラメータで、それぞれ

$$v_c = \frac{1}{2} \left[ 1.156g(\bar{\eta} + h) |U| / C^2 \right] \quad (8)$$

$$\alpha = \left( \frac{H}{\bar{\eta} + h} \right)^3 \quad (9)$$

で、 $C$ はChezy係数である。

その他、O'Conner and Yoo<sup>16)</sup>は、乱流モデルを導入し2方程式を、黒岩ら<sup>17)</sup>は、1方程式を用いて渦動粘性係数を評価し、沿岸流場の実験結果と比較しているが、沿岸流速のピーク位置が大きく異なり、実験結果との対応があまり良くない。SHORECIRCモデル<sup>18)</sup>では、底面摩擦、BtモデルとSmagorinskyモデルを組み合わせた渦動粘性係数を用いており、係数の与え方は様々である。

図-7は式(4)~(9)を用いて計算した渦動粘性係数の岸沖分布を示した一例である。図中の左の縦軸の値はLHモデルに対するものである。本計算で用いた各モデルの係数は、表-1に示すとおりで、従来の研究に基づき、LH以外は、係数の値がほぼ同じオーダーとなるよう設定している。LHモデルの場合、従来用いられている0.01のオーダーであるが、図-7からわかるように、係数の値は他のモデルとかなりオーダーが異なっている。以上の4つのモデルを用いてカस्प地形で発生する沿岸流と離岸流計算を行い、渦動粘性係数の分布が流れ場に与える影響について検討する。図-8は、LHモデルを用

いた計算例で、前出の図-5の結果と比較すると、沖側( $x=400\text{m}$ 付近)の、 $y=300\sim 400\text{m}$ の範囲で海浜流のパターンが異なっている。各モデルによる計算結果を詳細に比較した結果を図-9と図-10に示す。

表-1 渦動粘性係数

$N_{LH}$	$N_B$	$N_{LK}$
0.01	0.5	0.5

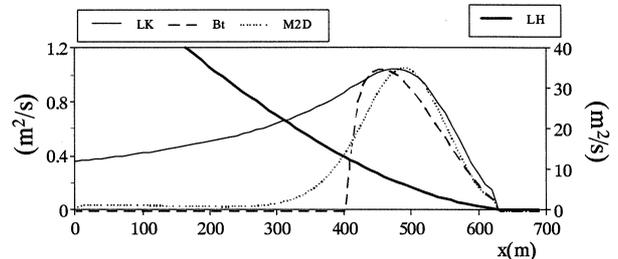


図-7 渦動粘性係数の岸沖分布 ( $H_{1/3}=1.5\text{m}$ ,  $T_{1/3}=7.0\text{s}$ ,  $\theta=20^\circ$ )

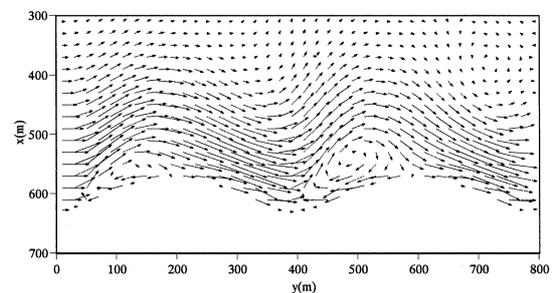


図-8 カस्प地形上の海浜流場の計算例 ( $v_e$ : LHモデル) ( $H_{1/3}=1.5\text{m}$ ,  $T_{1/3}=7.0\text{s}$ ,  $\theta=20^\circ$ )

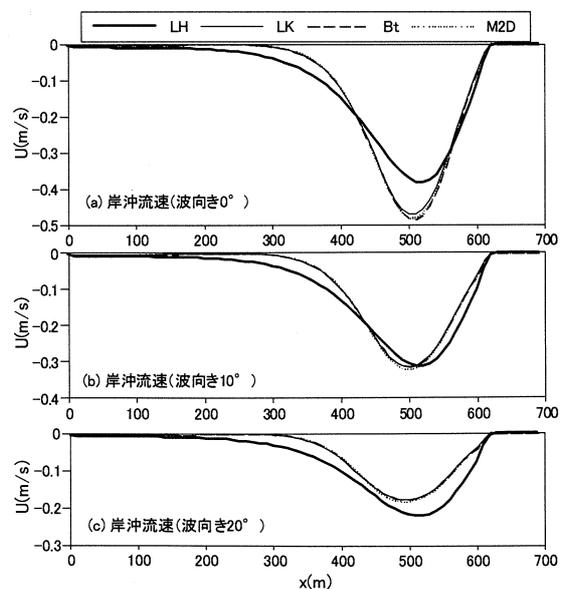


図-9 岸沖方向流速Uの流速分布 ( $y=400\text{m}$ )

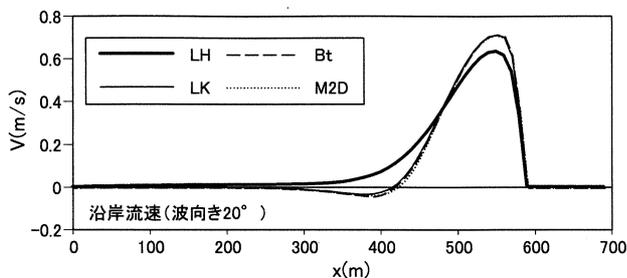


図-10 沿岸流速  $U$  の岸沖分布 ( $y=300\text{m}$ )

図-9 の結果から、離岸流速は明らかに波向きが大きくなるほど大きくなることわかるが、渦動粘性係数の与え方の違いについてみると、Bt モデル、LK モデルおよび M2D モデルによる計算結果の大きな違いはみられない。LH モデルを用いた場合は、他のモデルと大きな違いが確認できる。波向きが大きくなるにつれ、他のモデルと比較して、沖向きの流れが他のモデルと比較して大きくなっていることがわかる。これについては、図-10 の沿岸流の比較と図-5 と図-8 の結果の比較から、波向きの変化に伴って発生する沖合での循環流の影響であると考えられる。

(2) 計算格子の大きさがカスプ地形に発生する離岸流場に与える影響について

まず、図-5 に示した条件（カスプ波長 400m で、波浪は、 $H_{1/3}=1.5\text{m}$ ,  $T_{1/3}=7.0$ , 波向き  $20^\circ$ ）で、格子による違いを調べた計算例を図-11 に示す。格子サイズが大きくなるにつれ、流速の値が小さくなる傾向が明らかであるが、特に、格子 20m とした場合、顕著である。比較のため、LH モデルおよび FAVOR 法無し (NF) で計算した図-8 の結果も示している。格子 5m と 10m の場合、沿岸流速はダブルピークとなる分布となっているが、格子 20m の場合、格子の粗さから平滑化され、LH モデルの場合、さらに平滑化され流速値も小さくなり、岸沖流速のピーク位置が他のケースと異なることがわかる。このダブルピークはカスプの horn の左側に発生する渦流に当たるところで、図 (b) 中の格子 20m の FAVOR 法有りと無しの結果を比較すると、FAVOR 法有りの場合、沿岸方向の変動が大きく、境界近傍に発生する渦流の強さや形状に影響を及ぼすと考えられる。

つぎに、カスプ波長、計算格子の大きさが離岸流速に与える影響について検討した。計算に用いた地形と格子条件は、表-2 に示すとおりである。計算領域は図-8 に示した計算結果と同等で、その中に波長 100m, 200m, 400m の各カスプ地形に対して、計算格子を 5m, 10m および 20m とした 9 ケースを設定した。渦動粘性係数は M2D モデルを用い、波向きは  $0^\circ$  とした。図-11 は、計算結果の一例を示したもので、カスプ波長 400m, 格子サイズ 20m としたもので、カスプのベイから沖には向かう離岸流が計算されている。

最後に、9 ケースの計算結果から、カスプ波長、計算格子サイズと離岸流の最大流速との関係をまとめたものを図-13 に示す。この図から格子 5m の場合、カスプ波長が長くなるに伴い、離岸流の最大値は小さくなる傾向がある。一方、格子 10m と 20m の場合、カスプ波長が 200m のときに最も離岸流の最大値が大きくなっている。波長別にみると、波長 100m の場合は、格子の影響が顕著に現れ、格子 20m とした場合は、格子 5m の結果に対し、最大流速がかなり小さくなっている。波長 200m の場合、格子 5m と 10m のときは、ほぼ同最大流速が発生している。波長 400m の場合、各格子の差は小さくなっている。波長に対する格子分割数について検討すると、波長 100m に対して格子サイズ 5m では 20 分割、200m に対して格子サイズ 10m が 20 分割、波長 400m に対して格子サイズ 20m が 20 分割であり、本計算においては、カスプ波長に対して最低 20 分割する格子サイズ必要とすることがわかる。

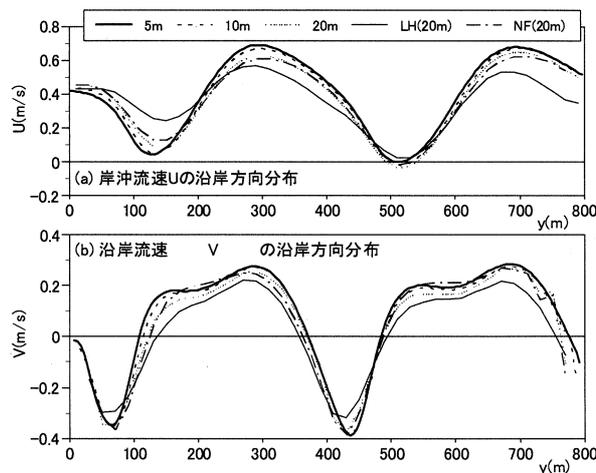


図-11 計算格子の違いによる岸沖および沿岸流速分布の比較 ( $x=530\text{m}$ )

表-2 計算条件

ケース	カスプ波長(m)	格子サイズ(m)
1	100.0	5, 10, 20
2	200.0	5, 10, 20
3	400.0	5, 10, 20

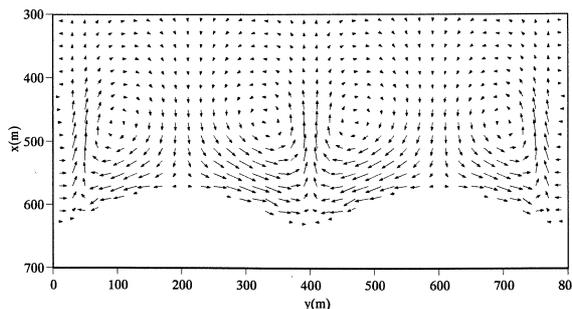


図-12 カスプ地形における離岸流の計算例 ( $H_{1/3}=1.5\text{m}$ ,  $T_{1/3}=7.0\text{s}$ ,  $\theta=0^\circ$ )

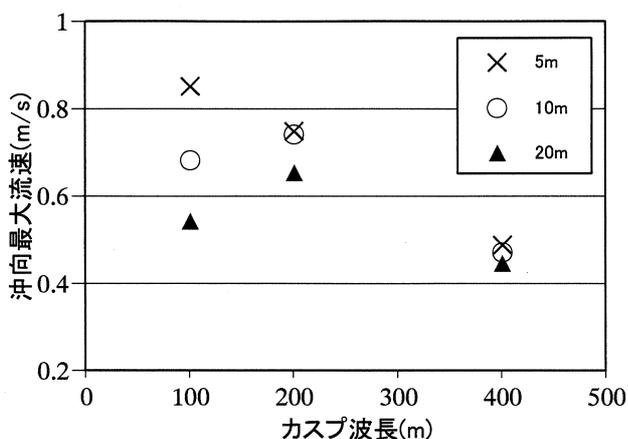


図-13 カスプの波長，計算格子サイズと離岸流の最大流速との関係

## 5. おわりに

本研究では，FAVOR を用いた平面 2 次元海浜流モデルを構築し，さらに，計算格子の大きさと渦動粘性係数が海浜流場に与える影響について検討した。得られた結果は以下のとおりである。

- 1) FAVOR 法を導入することで，汀線や構造物近傍の海浜流場が滑らかに計算されることが確認できた。
- 2) 渦動粘性係数の与え方，特に LH モデルは他のモデルと比較して海浜流のパターンおよび流速の大きさが異なることが明らかである。また，格子の大きさが明らかに海浜流速に影響を及ぼすことが示された。
- 3) カスプ地形における離岸流場の計算においては，カスプ波長に応じて適切な格子などの選択が必要であることが明らかとなった。

最後に，本研究で行った計算は，定性的なものであり，モデルの妥当性や，渦動粘性係数と計算格子の与え方を定量的に評価する必要がある。今後詳細な模型実験，現地観測等を行い，再検討する必要がある。

謝辞：本モデルの開発と計算に際し，間瀬ら<sup>5)</sup>のモデルを使用させていただいた。また，当時鳥取大学大学院博士前期課程 2 年生の段田雄一氏には，計算の協力をいただいた。ここに，感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) 黒岩正光，口石孝幸，松原雄平：平面 2 次元と準 3 次元海浜流モデルによるハイブリッド型 3 次元海浜変形予測システム，海岸工学論文集，第 53 巻，pp.486-490，2006。

- 2) Hirt, C.W. and Sicilian, J.M.: A Porosity Technique for the Definition of Obstacles in Rectangular Cell Meshes, *Flow Science, Inc. Los Alamos, New Mexico*, pp.450-469, 1985.
- 3) 梶川勇樹，檜谷治：幅水深比の小さな様湾曲水路における砂堆発生時の局所流に関する 3 次元数値計算，水工学論文集，第 53 巻，pp.883-888，2009。
- 4) 米山望，永島弘士，戸田圭一：FAVOR 法を用いた陸上津波遡上に伴う漂流物挙動の数値解析，水工学論文集，第 52 巻，1399-1404，2008。
- 5) 間瀬肇，高山知司，国富将嗣，三島豊秋：波の回折を考慮した多方向不規則波の変形計算モデルに関する研究，土木学会論文集，第 628 号，II-48，pp.177-187，1999。
- 6) Militello, A., Reed, C.W., Zundel, A.K. and Kraus, N.C.: Two-dimensional depth-averaged circulation model M2D: Version 2.0, Report 1, *Technical documentation and user's guide*, TR-04-2, *Coastal and Hydraulics Laboratory, US-Army Corps of Engineering*, 76p., 2004.
- 7) 合田良実：不規則による沿岸流速に及ぼす諸要因の影響の検討 (Version 4)，*ECOH/YG 技術論文*，No.4，24p，2004。
- 8) Longuet-Higgins, M.S.: Longshore currents generated by obliquely incident sea waves (1 and 2), *J. Geophys. Res.*, 75, pp.6778-6801, 1970.
- 9) 西村仁嗣，丸山康樹，桜井力：海浜流の数値計算法について，第 31 回海岸工学講演会論文集，pp.396-340，1984。
- 10) Deguchi, I., Arita, M., Yoshii, T. and Yabusaki, H.: Generation of rip currents from single disturbance in bottom topography, *Proc. of the 18<sup>th</sup> International Offshore and Polar Engineering Conference*, pp.768-774, 2008.
- 11) Battjes, J.A.: Modeling of turbulence in the surf zone, *Proc. Symp. Modeling Techniques*, pp.1050-1061, 1975.
- 12) Dally, W. R., Dean, R. G. and Dalrymple, R. A.: A Model for Breaker Decay on Beaches, *Proceedings of the 19<sup>th</sup> International Conference on Coastal Engineering*, pp.82-97, 1984.
- 13) Pechon, P. and Teisson, C.: Numerical modeling of bed evolution behind a detached breakwater, *Proceedings of the 19<sup>th</sup> International Conference on Coastal Engineering*, pp.2050-2062, 1996.
- 14) Reniers, A.J.H.M., Roelvink, J.A. and Thornton, E.B.: Morphodynamic modeling of an embayed beach under wave group forcing, *J. of Geophys. Res.*, Vol. 109, C01030, 2004
- 15) Larson, M. and Kraus, N.C.: Numerical model of longshore current for bar and trough beaches, *J. Waterway Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, 117(4), pp.326-347, 1991.
- 16) O'Conner, B.A. and Yoo, D: Turbulence modelling of surf zone mixing processes, *Coastal Hydrodynamics*, ASCE, pp.371-383, 1987.
- 17) 黒岩正光，松原雄平，犬飼拓志，野田英明，孫彰培：1 方程式乱流モデルを用いた準 3 次元海浜流数値シミュレーション，海岸工学論文集，第 48 巻，pp.126-130，2001。
- 18) Svendsen, I. A., Hass, K. and Zhao, Q.: Quasi-3D nearshore circulation model SHORECIRC, Version 2.0, User's Guide, Center for Applied Coastal Research, University of Delaware, 65p.