

備讃瀬戸の航路・ポケット浚渫部および 塩釜における流れと地形変化

FLOW AND TOPOGRAPHY CHANGE OF FAIRWAY, DREDGED REGION AND
SHIOGAMA AT BISAN SETO

伊福誠¹・中田正人²・白神秀晃³・樋口貴生⁴

Makoto IFUKU, Masato NAKATA, Hideaki SHIRAGA and Takao HIGUCHI

¹正会員 工博 愛媛大学大学院教授 理工学研究科 (〒790-8577 松山市文京町3番)

²正会員 博(工) 株式会社エイトコンサルタント プロジェクト部 (〒790-0054 松山市空港通2-9-29)

³学生会員 愛媛大学大学院 理工学研究科 (〒790-8577 松山市文京町3番)

⁴五洋建設株式会社 東京土木支店 (〒112-8576 東京都文京区後楽2-2-8)

The numerical analysis by LES(Large Eddy Simulation) was carried out for the current and topography change around the fairway, dredged region and Shiogama(namely the deepest region) at Bisan-Seto. Near the slope of the fairway and dredged region, the spiral flow is related to the topography change. The flow accelerates and diverges radially near the top of slope at Shiogama at the flood tide. As the result, the bottom is eroded and the sediment is accreted at the top slope and the small hills are formed.

Key Words : *Spiral flow, bed load, topography change, LES*

1. はじめに

備讃瀬戸航路は、瀬戸内海を東西に結ぶ海上交通の要衝として、外国貿易上の国際幹線航路であるとともに、大阪湾・瀬戸内海諸港と九州間を結ぶ国内幹線航路としても重要な役割を果たしており、大小さまざまな船舶が頻繁に往来している。同航路は沿岸域の産業経済の発達に伴い航行船舶の増加・大型化が進み、安全で円滑な航路の整備が急務となっていた。そこで、備讃瀬戸航路の一部は、港湾区域外の水域における船舶の航行を確保するため、開発および保全に関する工事が必要とされ、「開発保全航路」に指定されている¹⁾。

航路周辺は多数の島嶼、暗礁等からなる複雑な地形であることから漂砂による航路の埋没現象が避けられず、航路を維持・整備するうえで大きな障害となった。とくに、北航路と南北連絡航路の交差部に位置する通称「イノサキノツガイ地区」(図-1中の実線で囲んだ領域)では、起伏の大きい海底の地形変動(以下、サンドウェーブと記す)が顕著になったため、1981~1983年にかけて再び維持浚渫を実施した。維持浚渫終了後、約20年を経過した現在では、サンドウェーブの再生が顕著になり、北航路側では19mより浅い部分が生じている。さらに、南北連絡航路においては計画水深が13mであるにも係わらず

12mより浅い場所も確認されている。

イノサキノツガイ地区では、これまでに様々な形で航路埋没の遅延化を行ってきた。2001年からは、確保すべき計画水深より浅くなった同海域の維持浚渫を5ヵ年計画で実施し、2003年には航路の埋没を軽減する目的でポケット浚渫が行われ、2005年に完了した²⁾。

小笹³⁾は、北航路におけるサンドウェーブの形成過程や規模について詳細に検討している。しかしながら、南北連絡航路においては、三ツ子砂嘴と呼ばれる非常に浅い領域が隣接しており、この領域からの土砂移動によって航路埋没が生じているのではないかと推測されるものの、その実体解明のための検

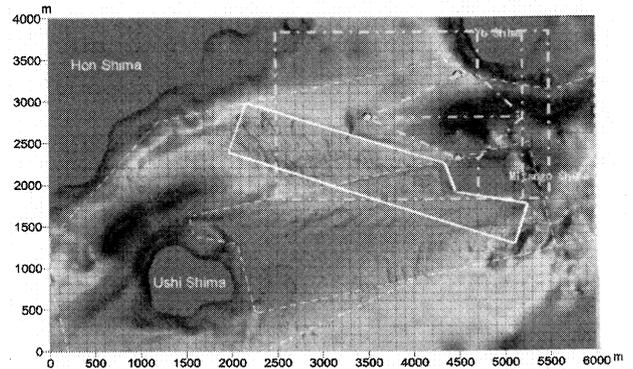


図-1 イノサキノツガイ周辺の海底地形

討はなされていないのが実情である。

伊福ら⁴⁾は、浚渫が完了した翌年、1985年から定期的に実施している深淺測量結果に基づいた詳細な解析を行い、イノサキノツガイ地区におけるサンドウェーブの形成および発達、漂砂の移動状況について明らかにするとともに、イノサキノツガイおよびその周辺における流況と地形変化の時空間的変動を数値解析的に検討しているが、十分な精度で地形変化を再現できるまでには至っていない。

こうしたことから、本研究では、備讃瀬戸航路の標準断面および2005年に完成したポケット浚渫部の形状を基に3次元LESを用いて、航路やポケット浚渫部の流れや地形変化について検討するとともに塩釜の法肩付近に形成されている馬の背状地形の形成メカニズムについて数値解析的に調べ、航路の維持・管理に対する基礎的資料を得ようとしたものである。

2. 数値解析

(1) 基礎方程式

a) 運動方程式と連続の式

x , y および z 方向の運動方程式は x 軸を水平な基準面にとり、 y 軸および z 軸を、それぞれ横断方向および基準面より鉛直上向きにとると次式で与えられる。

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\tau_{xx} - \frac{2}{3} K_G \right) + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right] \quad (1)$$

$$\frac{Dv}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\tau_{yy} - \frac{2}{3} K_G \right) + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right] \quad (2)$$

$$\frac{Dw}{Dt} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\tau_{zz} - \frac{2}{3} K_G \right) \right] \quad (3)$$

ここに、 $D/Dt \equiv \partial/\partial t + u(\partial/\partial x) + v(\partial/\partial y) + w(\partial/\partial z)$, t は時間、 u , v および w は、それぞれ x , y および z 方向の流速成分、 g は重力加速度、 p は圧力、 ρ は流体の密度、 τ_{xx} , τ_{yx} , τ_{zx} , τ_{xy} , τ_{yy} , τ_{zy} , τ_{xz} , τ_{yz} および τ_{zz} は subgrid scale 応力である。

Subgrid scale 応力はテンソル表示すると以下のよう表される。

$$\frac{\tau_{ji}}{\rho} = (v + v_t) \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (4)$$

ここに、 v は動粘性係数である。

また、 v_t は SGS(subgrid-scale) の渦動粘性係数であり、次式で与えられる。

$$v_t = (c_s \Delta)^2 \left[\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right]^{1/2} \quad (5)$$

ここに、 c_s は Smagorinsky 定数、 $\Delta = (\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z)^{1/3}$, Δx , Δy および Δz は、それぞれ x , y および z 方向の格子間隔である。

さらに、 K_G は SGS の乱流エネルギーであり、次式で与えられる。

$$K_G = (v_t / c_m \Delta)^2 \quad (6)$$

ここに、 c_m はモデル定数である。

また、連続の式は次式で与えられる。

$$\partial u / \partial x + \partial v / \partial y + \partial w / \partial z = 0 \quad (7)$$

b) 水面形の方程式

水面形の方程式は連続の式を底面から自由水面の高さまで積分して、次式で与えられる。

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{z_b}^{\xi} u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{z_b}^{\xi} v dz = 0 \quad (8)$$

ここに、 ξ および z_b は、それぞれ基準面から水面および海底面までの高さである。

c) 限界摩擦速度の評価

底質に対する限界摩擦速度 V_{*c} は、岩垣公式⁵⁾を用いて決定する。

d) 摩擦速度の評価

摩擦速度 V_* は次式で算出する。

$$V_* = \sqrt{\tilde{f}(u^2 + v^2)} \quad (9)$$

ここに、 \tilde{f} は摩擦係数である。

e) 掃流砂量式

本研究では掃流砂のみを対象とするので、掃流砂量は Meyer-Peter・Müller の経験式⁶⁾で算出する。

$$q_B^* = 8\tau_*^{3/2} (1 - \tau_{*c} / \tau_*)^{3/2} \quad (10)$$

ここに、 q_B^* は無次元掃流砂量、 τ_* は無次元掃流力 ($\tau_* = V_*^2 / (\rho_s / \rho_f - 1)gd$), ρ_s : 砂の密度、 d : 底質の粒径、 τ_{*c} は無次元限界掃流力である。

f) 漂砂の連続式

局所的底面高さの時間変化の計算には、以下に示す漂砂の連続式を用いる。

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = -\frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial q_{Bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{By}}{\partial y} \right) \quad (11)$$

ここに、 q_{Bx} および q_{By} は、それぞれ x および y 方向の掃流砂量、 λ は空隙率である。

(2) 初期条件および境界条件

初期条件は静水状態とする。

入射境界、開境界、海底および自由水面においては、以下の境界条件を課す。

a) 入射境界(図-2, 3, 4の $x=0$ 側)

微小振幅波理論による水面変動量 η と流速 u , v

を与える。なお、鉛直方向流速は0とする。

b)開境界

物理量 F (水面変動量, 流速) には Sommerfeld の放射条件を課す。

$$\frac{\partial F}{\partial t} + c_x \frac{\partial F}{\partial x} + c_y \frac{\partial F}{\partial y} = 0 \quad (12)$$

ここに、 c_x および c_y は、それぞれ x および y 方向の波速である。なお、海底面の変動には以下の条件を課す。

$$\left. \begin{aligned} \partial^2 z_b / \partial x^2 &= 0 \\ \partial^2 z_b / \partial y^2 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

c)海底

海底においては no-slip の条件を課す。

$$u = v = w = 0 \quad (14)$$

d)自由水面

自由水面においては以下の条件を課す。

$$\left. \begin{aligned} p &= 0 \\ w_\xi &= \frac{\partial \xi}{\partial t} + u_\xi \frac{\partial \xi}{\partial x} + v_\xi \frac{\partial \xi}{\partial y} \\ \partial u / \partial z &= 0, \quad \partial v / \partial z = 0 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

ここに、 u_ξ 、 v_ξ および w_ξ は、水面における x 、 y および z 方向の流速成分である。

(3)パラメータの設定

Smagorinsky 定数は 0.1~0.25 の間にあるとされているが、本研究では低界値の 0.1 を用いる。なお、解析には σ 座標系を用いる。式(6)および(9)中のモデル定数および摩擦係数は、それぞれ 0.094 および 0.0026 とした。

半日周潮を対象とし潮位差は2.5mとした。さらに、流れの最強時の前後1時間の2時間分を計算した。

航路とポケット浚渫部を対象とした解析では、波の入射方向と x 軸とのなす角 θ が 0° 、 10° 、 20° および 30° の場合を計算した。なお、底質の粒径は 0.5mm, 空隙率は 0.4 とし、式(9)の摩擦速度の評価には海底上 1m の流速を用いた。

(4)解析領域

航路およびポケット浚渫部の解析領域は、 x 方向 2,000m, y 方向 1,400m とした。航路およびポケット浚渫部での水深は 15m, それを除く領域の水深は 13mである。なお、航路およびポケット浚渫部の斜面勾配は 1/10 である。 x および y 方向の格子間隔は 5~10m であり、航路およびポケット浚渫部の斜面付近の格子間隔を小さくした。水深方向は 15 等分した。

航路は、図-2に示すように、 $y = 300\text{m}$ から $y = 1,100\text{m}$ にかけて x 軸に平行に存在する底面に起伏のない航路モデルを用いた。ポケット浚渫部は、図-3に示すように、 $x = 600\text{m}$ から $x = 1,400\text{m}$ 、 $y = 300\text{m}$ から $y = 1,100\text{m}$ の正方形の浚渫部がある底

面に起伏のないポケットモデルを用いた。

与島と三ツ子島との間にある塩釜周辺(図-1中の一点鎖線で囲んだ領域)を対象とし、図-4のようなモデル地形を考えた。解析領域は x 方向が 2,100m, y 方向が 1,800m である。なお、最深部および最浅部の水深は、それぞれ 55m および 20m であり、水平格子間隔は 10m, 水深方向は 20 等分した。

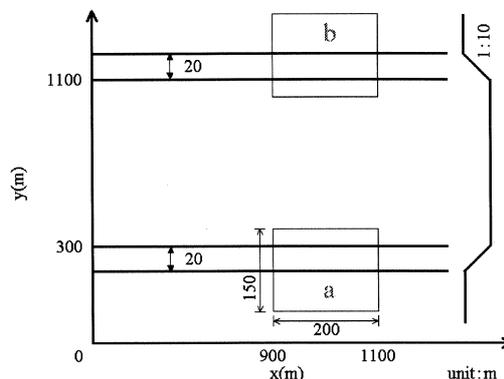


図-2 航路の形状

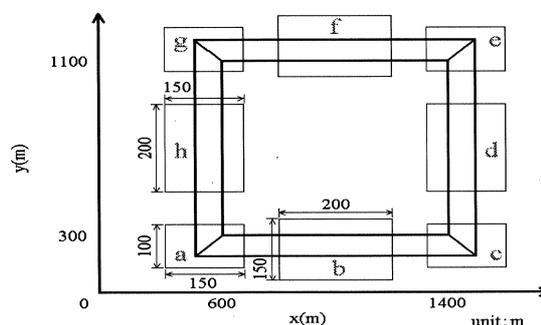


図-3 ポケット浚渫部の形状

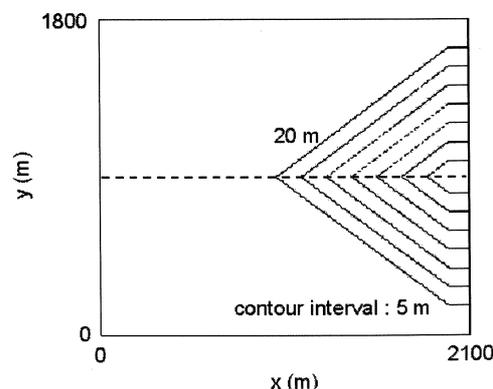


図-4 塩釜のモデル地形

3. 解析結果

(1)航路・ポケット浚渫部の流れ

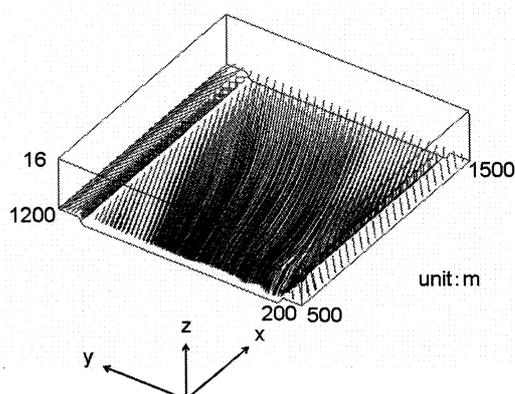
図-5は航路およびポケット浚渫部における流れを示したものである。(a)~(c)は航路、(d)と(e)はポケット浚渫部におけるものである。

(a)は、 $\theta=10^\circ$ の場合である。流線は航路外部から航路斜面付近に入ると、一旦、大きく上方へ向かい、その後斜面に沿って鉛直下方へ向かう。

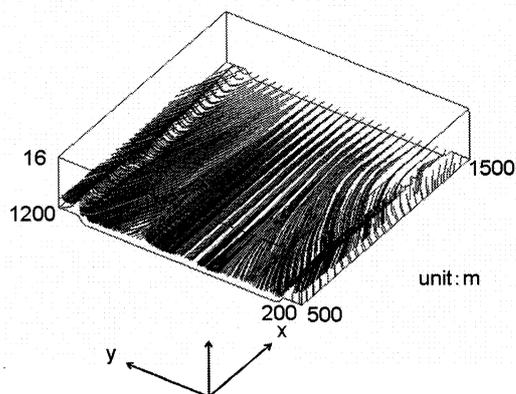
(b)は $\theta=20^\circ$ の場合である。流線は $y=1,100\text{m}$ 付近の斜面で模式図(c)に示すような歪んだ形状を示している。向かい合う斜面側では歪んだ楕円形状は確認できない。

ポケット浚渫部の斜面では、 x 軸に平行な斜面においては航路斜面と似た傾向を示している。また、 y 軸に平行な斜面においては、流れの上手側では斜面に沿って落ち込み、下手側では斜面を駆け上がっている。なお、 θ が増大すると、駆け上がった後の進行方向は入射方向とほぼ同一になる。

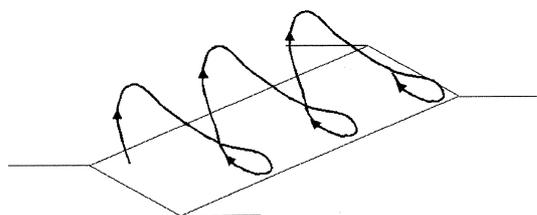
上述した斜面付近の複雑な流れが地形変化に及ぼす影響が大きいことが推測される。



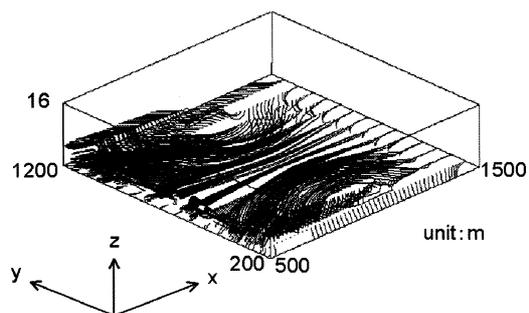
(a) 航路における流線($\theta=10^\circ$)



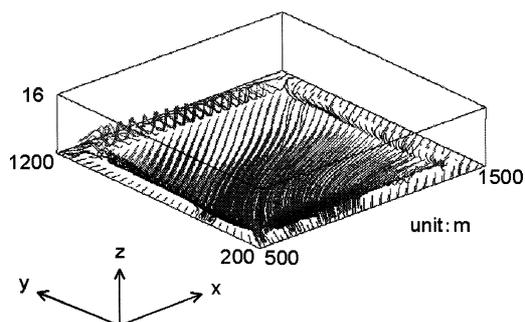
(b) 航路における流線($\theta=20^\circ$)



(c) 斜面近傍における流れの模式図



(d) ポケット浚渫部における流線($\theta=0^\circ$)



(e) ポケット浚渫部における流線($\theta=20^\circ$)

図-5 航路およびポケット浚渫部における流線

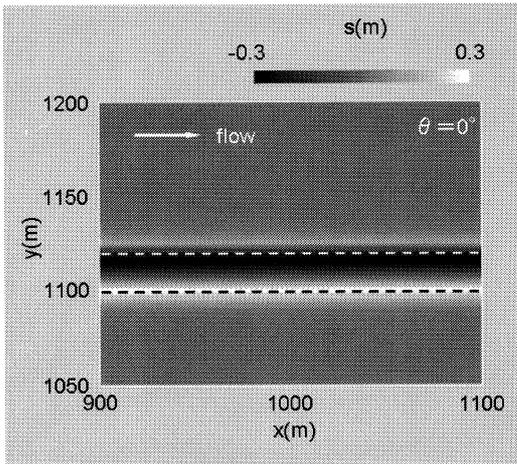
(2) 航路・ポケット浚渫部の地形変化

図-6の(a)および(b)は、それぞれ図-2および図-3中の領域bおよびaにおける地形変化を示したものであり、破線は法肩と法尻である。

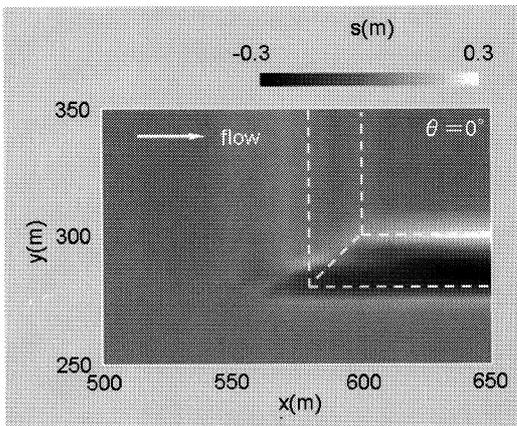
(a)は航路の場合であり、 $\theta=0^\circ$ である。斜面法尻の $y=300\text{m}$ から航路側にかけては斜面法尻の $y=280\text{m}$ から航路外にかけては堆積傾向にあり、最大堆積量は、それぞれ約 0.3m および約 0.2m である。また、斜面法尻の $y=280\text{m}$ から航路側にかけては侵食傾向にあり、最大侵食量は約 0.3m である。 θ が増大するにつれて、斜面法尻から航路側にかけての堆積量および侵食量は減少し、 $\theta=20^\circ$ になると侵食域は y 方向へ大きく移動する。

(b)はポケット浚渫部の場合であり、 $\theta=0^\circ$ である。 y 軸に平行な斜面では、堆積・侵食はほとんどないが、 y 軸に平行な $x=570\text{m}$ 付近では僅かに堆積傾向にある。一方、 x 軸に平行な斜面では、斜面法尻の $y=300\text{m}$ からポケット浚渫部の内側にかけては斜面法尻の $y=280\text{m}$ からポケット浚渫部の外側にかけて堆積傾向にあり、最大堆積量は、それぞれ約 0.3m および約 0.1m である。また、斜面法尻の $y=280\text{m}$ からポケット浚渫部の内側にかけては侵食傾向にあり、最大侵食量は約 0.3m である。なお、ポケット浚渫部の隅角部においては、最大で約 0.14m の堆積がある。(a)の航路と同様、 θ が増大す

るにつれて、堆積量および侵食量は減少する。



(a) 航路における地形変化($\theta=0^\circ$)



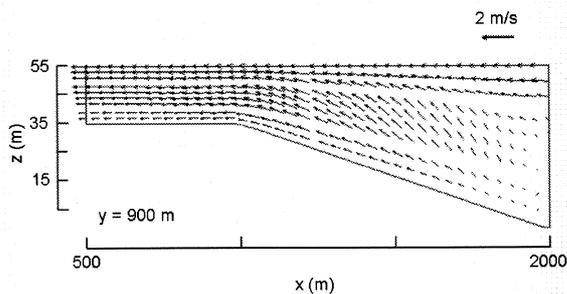
(b) ポケット浚渫部における地形変化($\theta=0^\circ$)

図-6 航路およびポケット浚渫部における地形変化

(3) 塩釜周辺の流れ

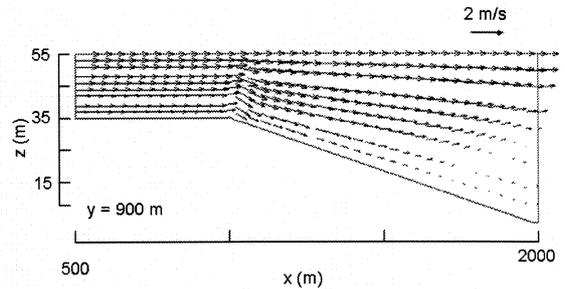
図-4中の破線、 $y = 900\text{m}$ における流速ベクトル($u-w$)を示したのが図-7であり、(a)および(b)は、それぞれ西流および東流最強時の結果である。

(a)における最大流速は約 1.3m/s である。塩釜の法肩近くでは鉛直上向きの流れが生じている。また、塩釜の斜面を駆け上がった水塊は縮流状態から解放されるため水平床上で流速が小さくなる。なお、西流時における最大流速は $y = 1,050\text{m}$ の断面で生じており 1.7m/s 程度である。



(a) 西流最強時における流速ベクトル($y=900\text{m}$)

(b)における最大流速は約 1.6m/s であり、西流時よりも僅かに遅い。塩釜の法肩近くでは鉛直上向きの流れが顕著である。また、この堆積領域より法面側では鉛直下降流が生じ、法面の底面近傍の流れは急激に小さくなる。

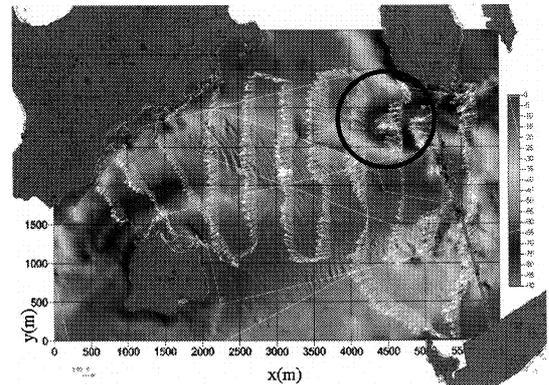


(b) 東流最強時における流速ベクトル($y=900\text{m}$)

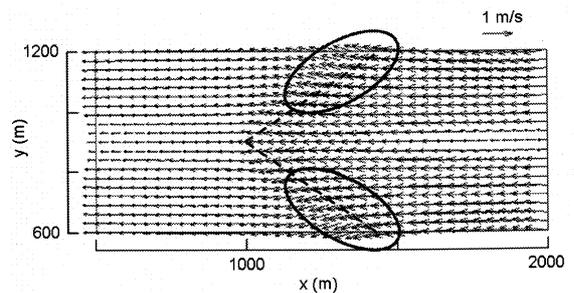
図-7 流速ベクトル

図-8の(a)および(b)は、それぞれ2007年12月の西流時における底層の観測値²⁾と塩釜の最深部から 36m 上方の高さにおける2次元ベクトルである。

(a)の観測値は、法肩付近(図中の黒丸の領域)では y 軸方向に拡がる流れが生じている。また、一様水深部における水平流速は法肩付近と比べて小さい。(b)をみると、法肩付近(図中の破線、黒丸の領域)では y 軸方向に放射状に拡がる流れが確認できる。また、一様水深部における流速は小さいことがわかる。観測結果と計算結果では僅かな差はあるが、塩釜周辺の流れを再現し得ている。



(a) 西流時における底層流速²⁾(観測値)



(b) 西流最強時における流速($z=36\text{m}$)

図-8 塩釜周辺の流れ

(4) 塩釜周辺の地形変化

図-9は西流最強時の x 方向の掃流漂砂量分布を示したもので、漂砂量は最小値で正規化している。また、図中の黒実線は初期状態の等深線である。

塩釜の法肩付近では、図-8(b)でみられるように塩釜を駆け上がった流れが法肩付近で放射状に拡がるため掃流漂砂量が多いことがわかる。また、一様水深部においては、底面近傍の流れが小さいため掃流漂砂量も少ない。

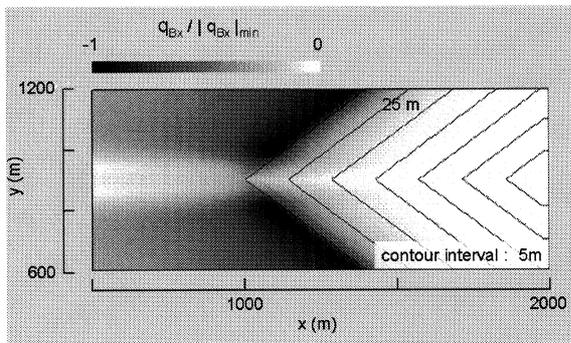


図-9 塩釜周辺の掃流漂砂量分布(西流最強時)

図-10に西流最強時の地形変化量を示す。図中の黒実線は等侵食量線あるいは等堆積線であり、コンターの間隔は0.1mである。

水深20mの塩釜法肩付近の領域が侵食され、法肩から $x=900\sim 1,000\text{m}$ 、 $y=900\text{m}$ 付近にかけて堆積領域が生じている。これはV字型の形状を有する塩釜で縮流された水塊が一様水深部で急激に流速が減少し、そこで掃流砂が堆積したためである。なお、最大堆積量は0.2m程度である。

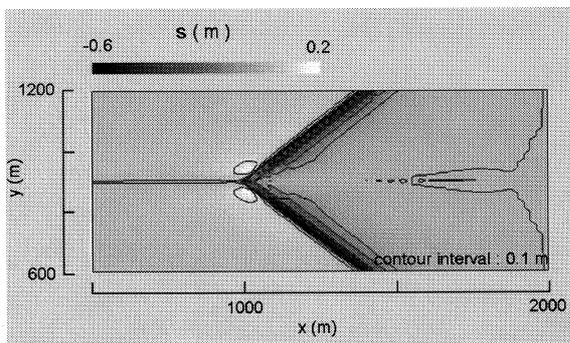


図-10 塩釜周辺の地形変化量(西流最強時)

4. おわりに

3次元数値モデルを用い、航路、ポケット浚渫域および塩釜周辺の流れと地形変化について数値解析的に検討した。その結果を要約すると以下の通りである。

- (1) 航路・ポケット浚渫部における地形変化は、斜面上に生ずる回転流と関わっている。
- (2) 塩釜周辺では、西流時には流れが放射状に拡がり、東流時には流れが塩釜の中心部に向けて収斂する。
- (3) 西流時には塩釜の法肩付近の東側斜面が侵食され法肩付近に堆積すること、一方、東流時には一様水深部からの掃流砂は、流速が激減する法肩付近に堆積することが判り、塩釜法肩部における馬の背状地形の形成機構が明らかになった。

参考文献

- 1) 運輸省第三港湾建設局：備讃瀬戸航路埋没予測調査報告書，89p., 1997.
- 2) 国土交通省四国地方整備局 高松港湾・空港整備事務所：備讃瀬戸航路サンドウェーブ調査報告書，84p., 2007.
- 3) 小笹博昭：備讃瀬戸における海底砂州，サンドウェーブの調査，港湾技術研究所報告，第14巻，第2号，45p., 1975.
- 4) 伊福 誠・小林泰之・坂田健治・西本光宏・中田正人：深浅測量結果に基づく備讃瀬戸航路の地形変化，海岸工学論文集，第49巻(1)，pp.556-560，2002.
- 5) Meyer-Peter, E. and R.Müller：Formulas for bed-load transport, *Proc. 2nd IAHR Congr.*, pp.39-64, 1948.
- 6) 椿東一郎：水理学Ⅱ，森北出版株式会社，p.219, 1980.