

沖合型養浜による土砂投入を考慮した3次元海浜変形予測モデル

3D Morphodynamic Predictive Model for Offshore Sand Nourishment

黒岩正光¹・澁谷容子²・松原雄平³・口石孝幸⁴

Masamitsu KUROIWA, Yoko SHIBUTANI, Yuhei MATSUBARA and Takayuki KUCHIISHI

This paper is concerned with a three-dimensional morphodynamic model for predicting bathymetry changes after sand nourishment in the offshore area. The presented model is based on the hybrid model with the depth-averaged and quasi-3D nearshore current modes proposed by Kuroiwa et al.(2006). The injection process of bed material is described by the depth-averaged advection-diffusion equation for suspended load. The formation of sand hill due to offshore nourishment is computed by the settling fluxes for suspended load. Firstly, the model tests for beach evolution due to offshore nourishment around two groins were carried out to investigate the performance of the presented model. Furthermore, the model was applied to a field observation for offshore nourishment to investigate the applicability of the model.

1. はじめに

侵食対策の1つとして、サンドリサイクルによる養浜工法があるが、効率よく汀線を維持するためには、侵食域に直接養浜する方法が望ましい。しかし、トラックによる陸上輸送が困難な場合やコストの問題等で、汀線付近への土砂輸送が困難な場合は、海上輸送によって沖合投入する方法が取られる。このような沖合型サンドリサイクルの効果は明らかにされていない。また、沖合型サンドリサイクルの効果を検討する数値モデルとして、等深線変化モデルによる手法が提案されているが（例えば、澁谷ら，2008），パーやトラフなど複雑な地形を有する海域の場合は，等深線変化モデルの適用は困難で，波と流れによる3次元海浜変形モデルが有効であると考えられる。例えばvan Duinら（2007）は，養浜後の地形に対してDELFT3D-MORを適用している。しかしながら，投入過程を考慮したモデルではない。本研究では，沖合土砂投入の影響を考慮した3次元海浜変形予測モデルを提案し，数値実験的に土砂投入が地形変化に及ぼす影響について検討した。

2. 数値モデル

(1) 波浪場および海浜流場

本モデルは黒岩ら（2006）のハイブリッドモデルをベースとしたもので，図-1に示すように，3つのサブモデルから構成されている。波浪場は間瀬ら（1999）のエネルギー平衡方程式を用いて計算し，海浜流場は波浪条件

と海浜変形の再現期間や波と流れのフィードバック回数などによって平面2次元モードあるいは準3次元モードが選択されるようになっている。

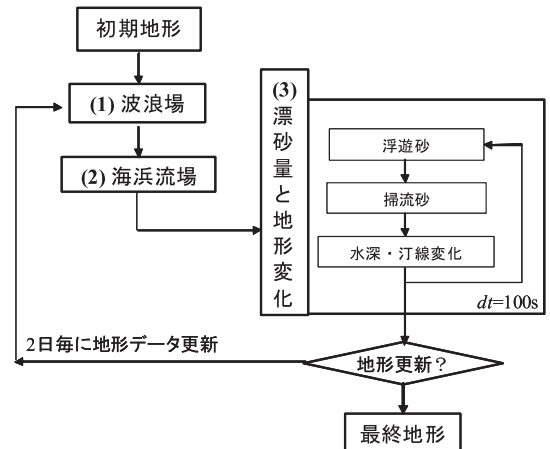


図-1 数値モデルの計算の流れ

(2) 漂砂量および地形変化

黒岩ら（2006）のモデルの全漂砂量は浮遊砂と掃流砂の総和で表されているが，本研究では，土砂投入を考慮するため，浮遊砂の計算には，榎木ら（1984）の移流拡散方程式によるフラックスモデルを導入し，地形変化の計算は，浮遊砂の沈降フラックス $w_s C$ と巻上げフラックス F_z の差 Q_s と掃流漂砂の場所的变化，すなわち，次の連続式

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{1-\lambda} (-Q_s) + \frac{1}{1-\lambda} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(q_{bx} + \varepsilon_s |q_{bx}| \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(q_{by} + \varepsilon_s |q_{by}| \frac{\partial h}{\partial y} \right) \right\} \quad \dots\dots (1)$$

1 正会員 博(工) 鳥取大学大学院准教授工学研究科
2 学生会員 修(工) 鳥取大学大学院工学研究科
3 正会員 工博 鳥取大学大学院教授工学研究科
4 正会員 博(工) いであ株式会社

より計算する．ここに， h は水深， q_{bx} ， q_{by} は掃流漂砂で，渡辺ら(1984)のモデルをベースとしたものである． Q_s は

$$Q_s = F_z - w_f C \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$F_z = \alpha(1-\gamma)C_0 w_f \left(\frac{u_*}{w_f} - 1 \right), \quad \begin{cases} u_* \geq w_f : \gamma = 0 \\ u_* \leq w_f : \gamma = 1 \end{cases} \quad \dots\dots (3)$$

ここに， α は無次元係数で0.001とし， C_0 は基準点濃度， w_f は砂の沈降速度でRubeyの式で計算する． u_* は波と流れ共存場における摩擦速度である． C は断面平均された浮遊砂濃度で，以下に示す平面2次元移流拡散方程式で計算される．

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{Q_s}{h + \eta} \quad \dots (4)$$

以上，浮遊砂の巻き上げから移流拡散と沈降過程とそれに伴う地形変化を出来る限り忠実に表すため，図-1に示すような，波と流れ計算へのフィードバックは2日毎に，浮遊砂と地形変化計算は100秒毎に行った．

(3) 土砂投入計算

土砂は体積量であるが，投入時には波浪や流れが作用するためその影響を考慮する必要がある．したがって投入過程における土砂は，水面から投入される浮遊砂として取り扱うこととし，濃度値として与え，式(4)の移流拡散方程式と式(1)の連続式を用いて，土砂の投入と地形変化を計算する．まず，後述する1/65の一樣勾配斜面を有するモデル地形において水深6m付近へ土砂投入を行った計算例を図-2に示す．投入時の有義波高($H_{1/3}$)は1.5m，周期($T_{1/3}$)は7.0s，主波向(θ)は20°とした．投入範囲は100m×100mで，20日間連続投入した．濃度値は0.0006とし，土砂の中央粒径は0.2mmである．20日間の連続投入終了時で約20,000m³で相当する．この図から，土砂の投入とともに，砂堆が形成され，終了後は，砂堆が小さくなり土砂の移動が見られる．

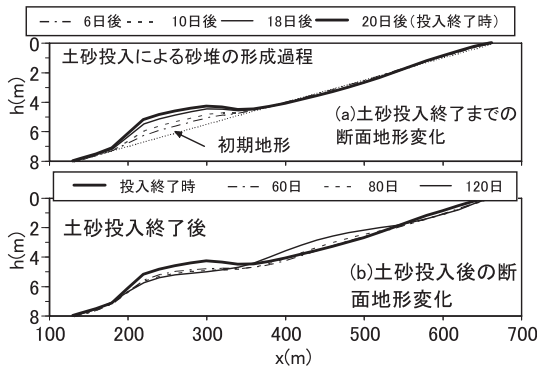


図-2 投入土砂による地形変化

3. モデル地形における計算結果

沿岸漂砂の卓越する突堤周辺と港の沖防波堤による遮蔽の影響による地形変化をモデル地形において検討した．

(1) 突堤における地形変化計算例

a) 養浜無しの場合

モデル地形の計算領域は沿岸方向に1200m，岸沖方向800mで，海底勾配は1/65とし，2基の突堤を配置した．波浪条件は $H_{1/3}=1.5$ m， $T_{1/3}=7.0$ s，主波向 θ は20°で，方向集中度 S_{max} は75とした．図-3は，土砂投入無しの120日後の地形変化計算結果を示したもので，2日毎に波と流れ計算へフィードバックさせた．図から2基の突堤内において漂砂の上手側で顕著な汀線の前進が再現されている．水深3mから6mの等深線は海浜流による影響で蛇行しており，宇多ら(2008)が示した現地調査結果と類似した結果となっている．沖合においては，1基目(左側)の突堤先端付近では，等深線の前進が，一方，2基目(右側)の突堤先端付近では等深線の後退が見られる．

b) 沖合土砂投入の計算

沖合土砂投入による地形変化を検討した結果を図-4(a)～(c)に示す．それぞれ土砂を1基目(左側)付近($y=450$ m)，中央($y=600$ m)および2基目付近($y=800$ m)の水深6mの位置に投入した計算結果である．土砂投入は初期地形に対して20日間連続投入し，投入領域における濃度は0.00006(約20,000m³に相当)である．土砂投入時の地形変化の様子は前出しの図-2に示すとおりである．図-5は水深6mおよび0m(汀線)における等深線の比較を示したものである．図-4および図-5(a)の水深6mの等深線の比較から水深6m付近に投入された土砂の影響により等深線6mの局所的な前進が見られる．図-5(b)から汀線変化を比較すると，左側および中央付近に土砂投入した場合，養浜無しの際に汀線が後退していた箇所が維持されているのがわかる．また中央付近に土砂を投入した場合は，突堤間のほぼ中央における汀線が前進し舌状となっている．一方，下手側に投入した場合

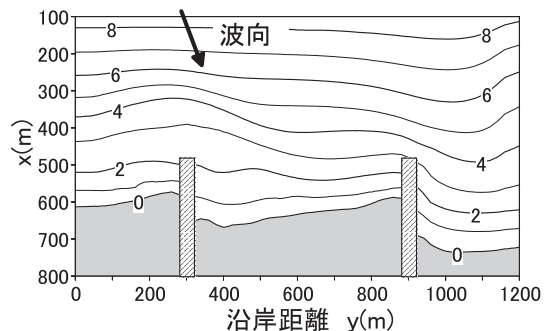


図-3 土砂投入無し(120日後)

は明らかに汀線変化に影響を与えないことがわかる．以上のように，沖合に土砂を投入することで，図-6に示すような波高分布の違いが見られ，周辺の流れ場に影響を及ぼし，地形変化に違いが現れることが明らかである．

c) 汀線付近への土砂投入の計算例

図-7は，養浜無しで60日計算した後，沿岸方向

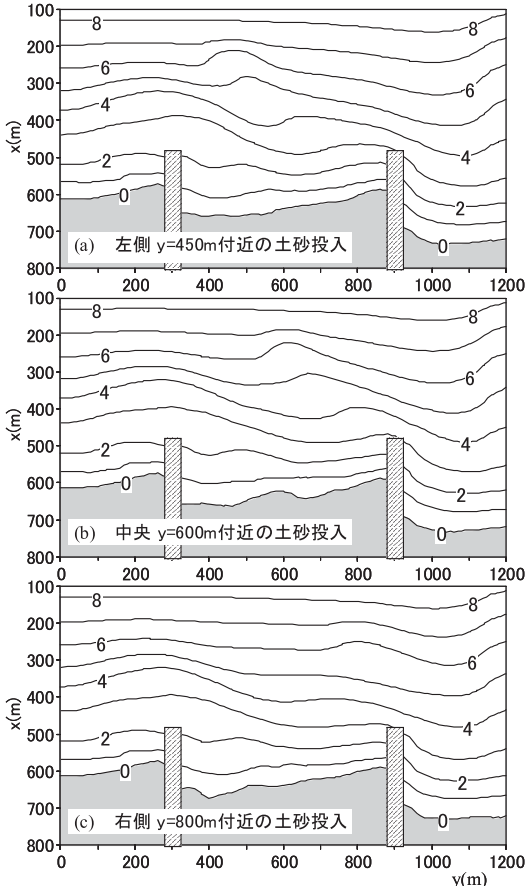


図-4 土砂投入後の地形変化の計算結果（120日後）

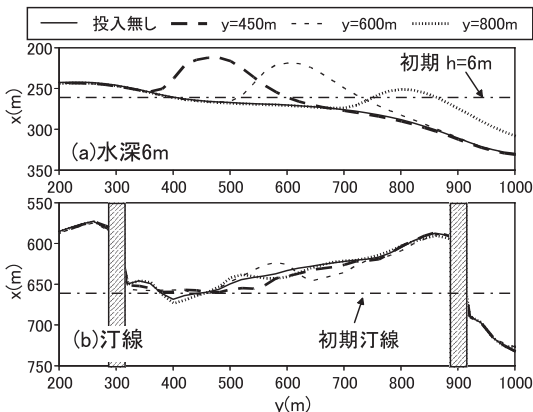


図-5 汀線変化の比較

$y=400\text{m} \sim 500\text{m}$ の範囲の水深1m付近に土砂投入を行った場合の汀線の変化を示したもので，図-7（a）は $C=0.00006$ ，（b）は $C=0.0001$ としたものである．沖合土砂投入の場合と同じ $C=0.00006$ とした場合，400m付近の汀線の顕著な変化は見られないが，濃度値を大きくすると汀線の前進が見られる．濃度値として与える場合，碎波帯内に投入した場合，投入と同時に流れによって即座に移流拡散してしまい，沈降量が少なくなり，地形変化への寄与が小さくなることが原因であり，所定の土砂量を投入する場合，やや大きめの濃度値として与える必要があると考えられる．

(2) 防波堤遮蔽域における地形変化計算例

図-8（a），（b）に示す海浜流場に対する土砂投入計算を試みた．計算領域は，岸沖方向800m，沿岸方向1600mの範囲で，海底勾配は1/65である． $H_{1/3}$ は1.5m， $T_{1/3}$ は7s，波向 θ は $\pm 20^\circ$ とし，それぞれ120日間の地形変化を計算した．土砂は，図中 $y=400 \sim 500\text{m}$ の範囲の水深2m付近に投入した．投入濃度値は，土砂投入の影響を見やすくするため，やや大きめの0.0002とした．図-9（a）および（b）はそれぞれ波向 20° および -20° のときの土砂投入を行った場合の120日後の計算結果である．図-10は汀線および水深1mの等深線を比較したもので，図には土砂投入無しの場合の計算結果も示している．図-8および9から，波向 20° の場合，港口部へ向かう沿岸流による汀線の前進と，港口部への土砂の堆積の様子が再現されている．一方，波向 -20° の場合は，沖防波堤の遮蔽域の循環流による汀線の後退と港口部への土砂堆積が再現されている．図-10より，土砂を投入した場合，水深1mの等深線の前進量が大きく，特に，波向 20° の場合は顕著である．

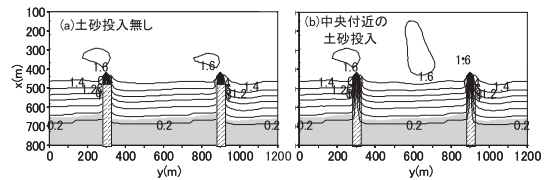


図-6 計算開始20日後の波高分布の比較

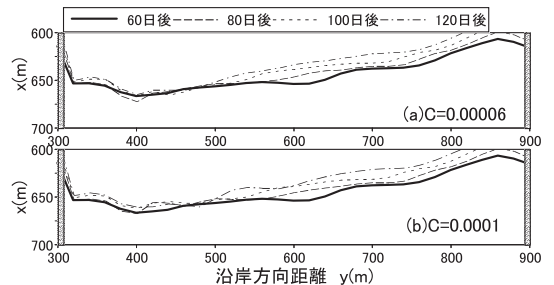


図-7 汀線付近への土砂投入による汀線変化

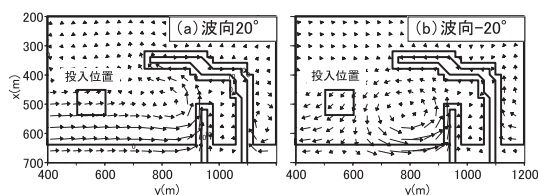


図-8 初期地形に対する海浜流場の計算結果

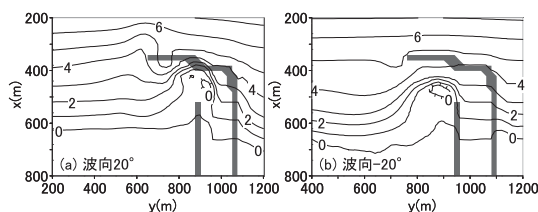


図-9 土砂投入120日後の地形変化の計算結果

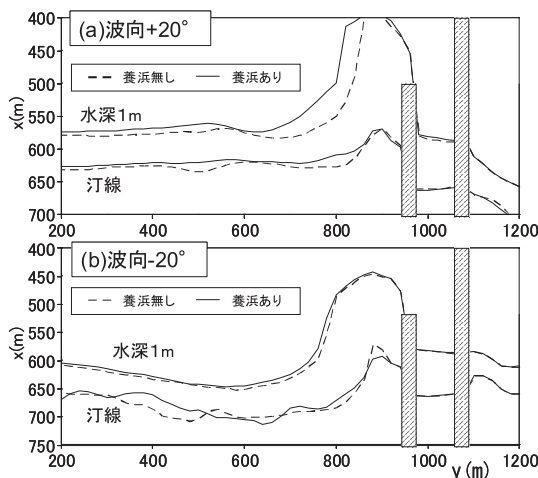


図-10 汀線変化の比較

4. 現地沖合土砂投入への適用例

最後に、宇多ら (2008) によって2007年3月9日～8月6日までに実施された沖合土砂投入の現地観測結果に基づき、モデルの適用性について検討した。

(1) 地形、波浪および計算条件

現地地形は、宇多ら (2008) の図面を参考に、海底勾配、突堤の位置等をモデル化した。波浪条件は、鹿島港沖で観測された波浪 (ナウファスより) を参考に、図-11に示す波浪時系列モデルを作成した。なお、波浪データは土砂投入が終了した5月9日以降のもので、0.5m以下の波高は除外した。波向きは 20° 、 S_{max} は75とした。海浜流場の計算において、有義波高が2mを超える場合は、準3次元モードで計算し、戻り流れの影響も考慮した。投入終了後から約3ヶ月間土砂の追跡調査が実施されているので、投入後100日程度の再現計算を行った。投入については、投入された日時とそのときの波浪条件は不明であるので、1日当たり約 $1,000\text{m}^3$ で、約 $20,000\text{m}^3$ (20

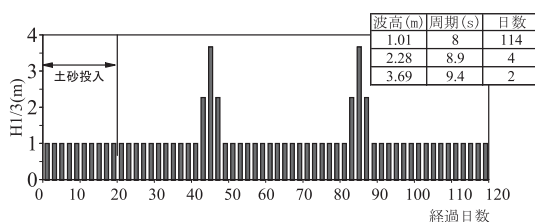


図-11 波浪時系列モデル

日間)の土砂を投入した。投入と同時に地形変化も計算した。なお、投入時の波浪は図-11に示すとおりである。

(2) 計算結果

図-12は土砂投入終了時 (20日後)、計算開始40日後、60日後、80日後および120日後の計算結果を示したものである。投入終了後、水深6mの等深線が冲向きに張り出す舌状の海底地形が形成され、その後時間の経過とともに、水深6mの等深線は沿岸方向に拡散している様子が再現されている。特に、高波浪来襲時に大きく地形変化が起こる。これらの沖合の地形変化の傾向は、宇多ら (2008) の現地調査結果と良く類似していることがわかる。

沖合土砂投入による汀線変化の影響については、宇多らの調査結果からは明らかにされていない。そこで、土砂投入無しによる汀線変化と比較した。図-13は120日後の最終地形における汀線変化量を比較したものである。波浪の影響も検討するため、土砂投入終了後の波浪データをすべて平均して計算した結果も示している。この図から、図-11の2つの時化を考慮して養浜無しで計算した場合が、もっとも汀線後退が大きいのが明らかである。土砂投入を実施した場合は、汀線の後退は見られるものの、養浜無しの場合に比較して汀線後退量は少ないことがわかる。一方、高波浪を考慮せずに調査期間中の有義波の平均 ($H_{1/3}=1.26\text{m}$, $T_{1/3}=8.06\text{s}$) の条件において、養浜を行った場合、侵食域の汀線は後退せずに維持されていることが分かる。これは、沖合に投入した土砂の移動が少なく、舌状地形が維持され、その地形の影響で沿岸方向の $y=600\text{m}$ 付近の汀線後退を助長するような波と流れが発生しなかったと考えられる。図-14は、高波浪時における土砂投入した場合 (a) と投入無し (b) の海浜流場の計算結果の一例で、この図から、土砂投入によって海浜流のパターンが変化することが見て取れる。以上のことから、投入土砂によって形成された砂堆が、ひとつの漂砂制御構造物の役割を果たしているものと考えられ、沖合型養浜が有効であることが示唆される。

5. おわりに

本研究では、沖合土砂投入を考慮した3次元海浜変形予測モデルを提案した。土砂投入過程と投入後の地形変化を移流拡散方程式と沈降フラックスによる地形変化で

表すことにより、沖合型養浜による3次元海浜変形計算が可能であることがわかった。現地適用性を宇多ら(2008)が実施した沖合養浜時の土砂移動観測結果を用いて検討した結果、本モデルは現地の土砂移動の傾向を良く再現しており、有効性が確認できた。沖合養浜による場合は、土砂投入によって波浪場と海浜流場が変化し、周辺の海浜変形に影響を及ぼすことが示された。

最後に、本モデルにおいては、濃度値から土砂投入量への変換方法や実際の汀線変化量など定量的な検討が不十分であり、今後の課題とする。

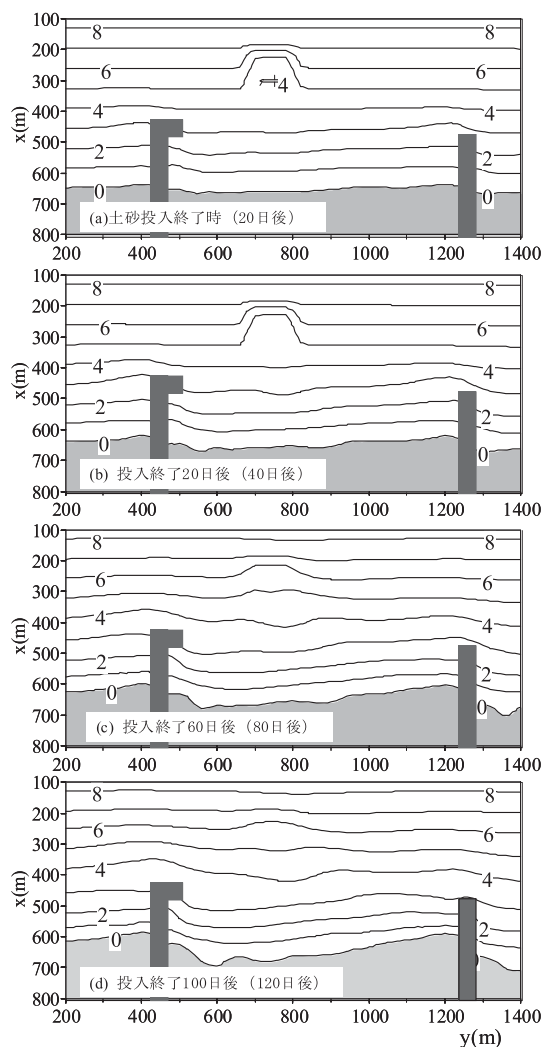


図-12 沖合土砂投入による地形変化の計算結果

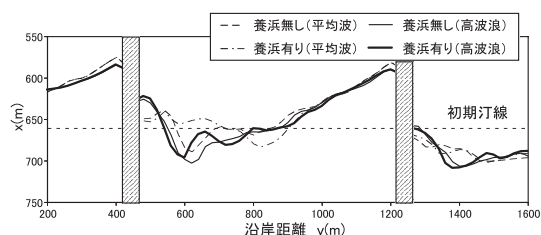


図-13 汀線位置の比較

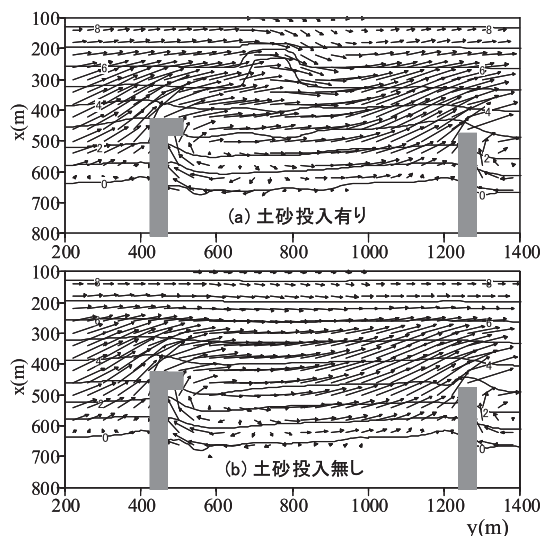


図-14 高波浪時の底面海浜流速

参考文献

- 宇多高明・田代洋一・長山英樹(2008)：ナローマルチビーム測量による沖合養浜時の土砂移動観測，海岸工学論文集，第55巻，pp.776-780。
- 黒岩正光・口石孝幸・松原雄平(2006)：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.479-552。
- 榎木 亨・李 宗燮・出口一郎(1984)：河口周辺の海浜流及び地形変動モデルに関する研究，第31回海岸工学講演会論文集，pp.411-415。
- 澁谷谷子・黒岩正光・松原雄平(2008)：養浜土砂の移流拡散を考慮した等深線変化予測モデルに関する研究，海岸工学論文集，第55巻，pp.761-765。
- 間瀬 肇・高山知司・国富将嗣・三島豊秋(1999)：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。
- 渡辺 晃・丸山康樹・清水隆夫・榊山 勉(1984)：構造物設置に伴う三次元海浜変形の数値予測モデル，第31回海岸工学講演会論文集，pp.406-410。
- Van Duin, M.J.P., N.R. Wiersma, D.J.R. Walstra, L.C. van Rijn and M.J.F. Stive (2007): Nourishing the shoreface: observations and hindcasting of the Egmond case, The Netherlands, Coastal Engineering 51, pp.813-837。