

# 岸沖漂砂の卓越する海岸における 岸沖・沿岸漂砂統合モデル開発

祭田 佳奈江<sup>1</sup>・鷺田 正樹<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 セントラルコンサルタント株式会社 技術第一部 環境水工グループ

(〒104-0042 東京都中央区入船1-4-10)

E-mail:kmatsurida@central-con.co.jp

<sup>2</sup>正会員 セントラルコンサルタント株式会社 技術第一部 環境水工グループ (同上)

E-mail:mwashida@central-con.co.jp

本研究は、岸沖漂砂による地形変化量が卓越する海岸において、保全施設規模を検討し、効果を検証するために岸沖・沿岸漂砂両方を考慮したモデル「岸沖・沿岸漂砂統合モデル」の開発を行ったものである。

地形変化特性を把握するために、波浪と岸沖方向の地形変化の関係に着目した。波高3m以上で岸沖漂砂による地形変化が生じ、波高4mを境界として漂砂方向（岸向・沖向）が反転することを明らかにした。この特性を踏まえ、4つのモデル（SBEACH, Camenen・Magnus, 渡辺ら, ファンデルワーフらのモデル）を用いて、実測波浪による検証計算を行った結果、ファンデルワーフらのモデルが適していた。このモデルを基本に、波浪変形計算部分と粒径についてモデルの改良を行い、沿岸漂砂と岸沖漂砂を同時に計算出来るモデルを開発した。

**Key Words :** 岸沖漂砂, 沿岸漂砂, 地形変化予測, シミュレーション, 混合粒径, 海岸保全施設

## 1. はじめに

高知海岸は、土佐湾の湾奥部に位置し、その中央部には月の名所として知られる桂浜がある。高知海岸はかつて豊かな砂浜が広がる白砂青松の海岸であった。しかし、海岸侵食によって美しい砂浜も消失の脅威にさらされるようになり、昭和44年度には南国工区（延長8.15km）が、平成6年度には長浜～新居工区（延長9.80km）が直轄海岸に指定された。直轄以降、毎年ナローマルチによる深淺測量が200m間隔で沖合い800mまで行われている。また、波浪観測は平成8年以降、戸原沖水深約25m地点において継続的に実施されており、図-1に高知海岸の位

置と観測概要を示す。

国土交通省では、離岸堤や突堤などを中心とした保全施設の整備を進めている。これまで、施設諸元および土砂管理は、移動限界水深（-9m）以浅の土砂を対象としてきたが、平成16年～17年に高波浪が来襲し、移動限界水深を超える水深-15mまで顕著な土砂移動が確認された。また、岸沖漂砂による地形変化量が沿岸漂砂による変化量よりも卓越していることが明らかとなった。

本研究は、岸沖漂砂による地形変化量が卓越する海岸において、保全施設規模を検討し、効果を検証するために、岸沖・沿岸漂砂両方を考慮したモデル「岸沖・沿岸漂砂統合モデル」の開発を目的としている。

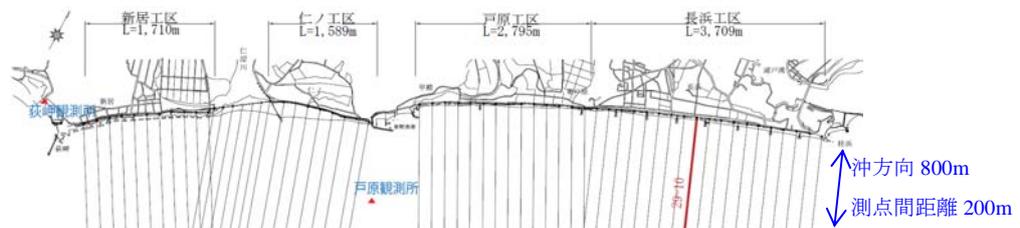


図-1 位置図

## 2. 高知海岸概況

これまでの高知海岸の海岸保全計画、土砂管理は、移動限界水深9mを指標として計画されており、移動限界水深以浅の土砂をヘッドランドで、ポケットビーチに閉じ込め、静的安定な海浜を創ることで、砂浜を保全し、土砂を管理する計画であった。

この計画を評価するモデルとして、沿岸漂砂を主体とする等深線モデル<sup>1)</sup>を用いて評価・検討を行ってきたが、平成16年～17年に高波浪が来襲し、沖合に大規模な土砂移動が確認された(図-2)。その水深は、従来の移動限界水深を超える水深-15mの場所で、沖合600m付近まで、土砂の顕著な移動が確認された。これまでの沿岸漂砂を主体とする静的海浜を創出する方向では、実現困難な大規模施設が必要となることが明らかとなった。

沖合地形の変化要因について検討した結果、岸沖漂砂が主体的な要因であり、海岸の勾配変化点(海岸堤防から150m付近)を境界として、岸側は沿岸漂砂が、沖側は岸沖漂砂が卓越する海岸であることがわかった。

現在、海岸堤防から150 mまでの沿岸漂砂を主体とする領域について、突堤の建設が進んでおり、計画している7基のうち5基が建設を完了している。これらの突堤は、一定の効果をあげてはいるものの、越波や侵食など海岸保全上の課題は引き続き存在している。今後、さらなる砂浜の拡大と安定が必要であり、そのための漂砂制御施設が必要な状況である。

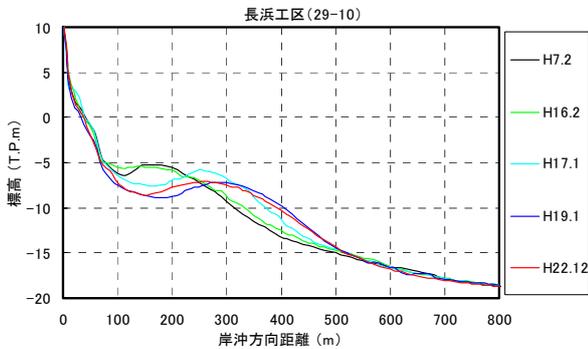


図-2 海岸断面の重ね合わせ(長浜工区 測線29-10)

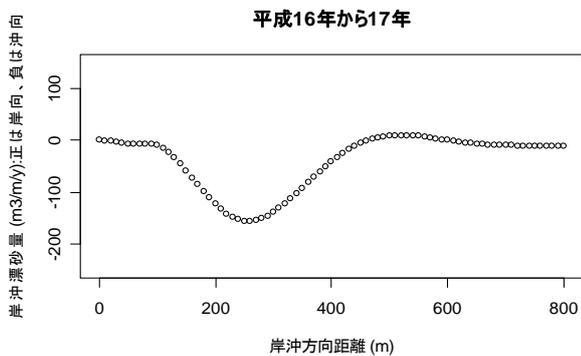


図-3 岸沖漂砂量

## 3. 高知海岸における岸沖漂砂移動限界波高

高知海岸における岸沖方向の地形変化を生じさせる波高(以下、砂州移動限界波高と呼ぶ)のうち、沖向き・岸向きの地形変化が起こる波高(以下、岸沖移動限界波高と呼ぶ)について検討と考察を行った。

まず、深浅測量結果から、各年の変化量から岸沖漂砂量を算出した。図-3に平成16年2月から平成17年2月の岸沖漂砂量を示す。

次に、各年の波浪観測結果から、砂州移動限界波高として2m以上に着目し、頻度図を作成した。図-4に平成16年の波浪頻度を示す。

砂州移動限界波高は2m～3.5m、岸沖移動限界波高が3.0m～4.5m程度と想定し、岸沖漂砂量は波高よりも波高の2乗に関係すると思った。これより、砂州移動限界波高から岸沖移動限界波高までの波高の2乗に頻度分布をかけたものから岸沖限界波高以上の波高の2乗に頻度分布をかけたものを差し引いた値を波高2乗係数とし、これと岸沖漂砂量と対応させた。限界波高別に計算を行った結果を表-1に示す。

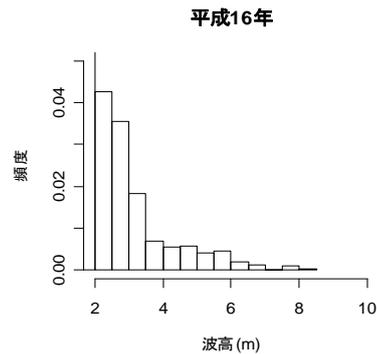


図-4 波高頻度図

表-1 限界波高と岸沖漂砂量の相関係数

相関係数R		砂州移動限界波高			
		2.0m	2.5m	3.0m	3.5m
岸沖移動 限界波高	3.0m	0.71	—	—	—
	3.5m	—	—	0.81	—
	4.0m	0.86	0.88	<b>0.89</b>	0.87
	4.5m	—	—	0.84	—

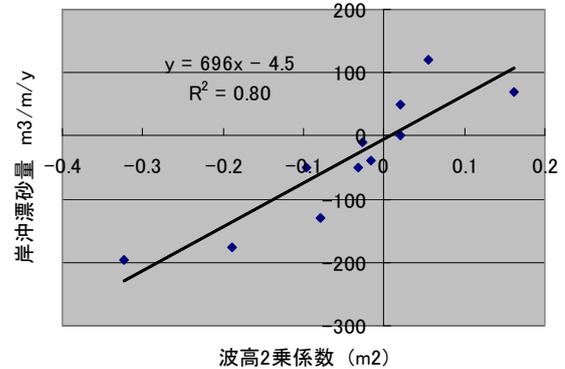


図-5 岸沖漂砂量と波高2乗係数の関係(移動限界波高3m, 岸沖限界波高4m)

表-1より、砂州移動限界波高を3.0m、岸沖限界波高を4.0mとした場合が最も相関が高い結果となった。すなわち、波高3mから4mの頻度が高ければ岸向き漂砂となり、波高4m以上の波浪が来襲すれば沖向き漂砂となることがわかった。

#### 4. 岸沖漂砂モデル開発

##### (1) 基本モデルの選定

高知海岸における岸沖漂砂による地形変化を、4つのモデル（SBEACHモデル<sup>2)</sup>、Camenen・Magnusのモデル<sup>3)</sup>、渡辺らのモデル<sup>4)</sup>、ファンデルワーフらのモデル<sup>5)</sup>）を用いて計算した結果を図-6、図-7および表-2に示す。図-6は岸向きの地形変化が生じた平成12年～平成13年の地形変化結果を示し、図-7は沖向きの地形変化が生じた平成16年～平成17年の地形変化結果を示し、表-2は実測地形と各モデルの地形予測計算結果との差分について標準偏差を示している。

表-2から、実測値と計算値を比較した時、差分の標準偏差が最も小さいファンデルワーフらのモデルを、最も整合性の高いモデルとして選定した。それぞれのモデルの特徴を以下に示し、計算結果の考察を表-3に示す。

##### ①SBEACHモデル

砕波帯内での定常断波のエネルギー分布が漂砂量を決めるモデルであり、沿岸砂州の形成や移動を含めた海滨断面形状を予測する断面二次元モデルである。漂砂量から連続の式を用いて地形変化を計算するものである。

##### ②Camenen・Magnusのモデル

浮遊砂、掃流砂について戻り流れ、波による水粒子速度から漂砂量を計算するモデルであり、岸沖漂砂の方向を波の非対称性で考慮し、モデルの適合性を実験値で検証したモデルである。

表-2 実測地形と地形予測計算結果差分の標準偏差

	SBEACH	Camenen	渡辺	ファンデルワーフ
岸向き方向	0.796	1.140	0.391	0.572
沖向き方向	0.785	0.449	0.648	0.393
相乗平均	0.790	0.715	0.503	0.474

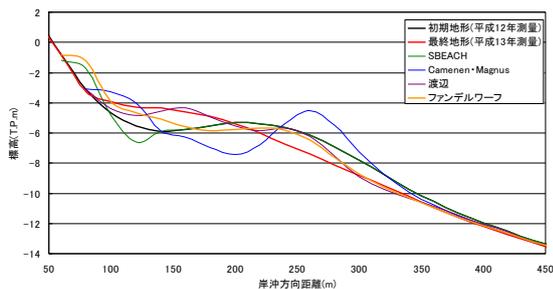


図-6 各モデルの地形変化予測結果（平成12年～平成13年）

##### ③渡辺らのモデル

波による漂砂量と戻り流れによる漂砂量の和で岸沖漂砂を表している。波による漂砂は掃流、浮遊、シートフローの3形態に分けられ、掃流では岸向き、浮遊では沖向き、シートフローでは岸向きとしている。

##### ④ファンデルワーフらのモデル

海底の状況、すなわち砂れんが形成されているか、シート状になって底質が移動するかを判定し、それに基づいて位相遅れパラメータを設定し、岸沖漂砂の方向を判定し、漂砂量を計算するモデルである。

##### (2) モデル改良

前述のとおり、ファンデルワーフらのモデルが高知海岸に適用している結果が得られたが、土砂動態の検討を行うにあたり、沿岸漂砂モデルと統合を行う必要がある。沿岸漂砂モデルと統合するにあたり、ファンデルワーフらのモデルを基本として、平面的な計算を可能とし、粒径の変化を計算出来るようにモデル改良を行った。

##### ①波浪変形計算の改良

ファンデルワーフらの岸沖モデルに用いられている波浪変形計算は、規則波レベルの自然海浜での断面波高変化計算モデルである。波の不規則性を考慮でき、構造物を反映できる波浪変形計算が必要である。

本研究では、広く一般に用いられるエネルギー平衡方程式を適用した。また、砕波指標は不規則波を対象としている合田の砕波指標を用いた。

表-3 各モデルの地形予測計算結果考察

	岸向き	沖向き
SBEACH	岸沖漂砂の発生点が異なる	汀線付近が侵食したが沿岸砂州の発生を再現でき
Camenen	沿岸砂州の岸側で谷が発生した	沿岸砂州の発生を再現できた
渡辺	再現できたが範囲が広がった	沿岸砂州の発生を再現できたが位置は異なった
ファンデルワーフ	位置、範囲共におおむね再現できた	沿岸砂州の発生を再現できた

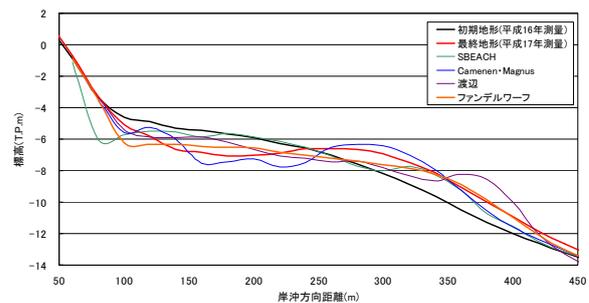


図-7 各モデルの地形変化予測結果（平成16年～平成17年）

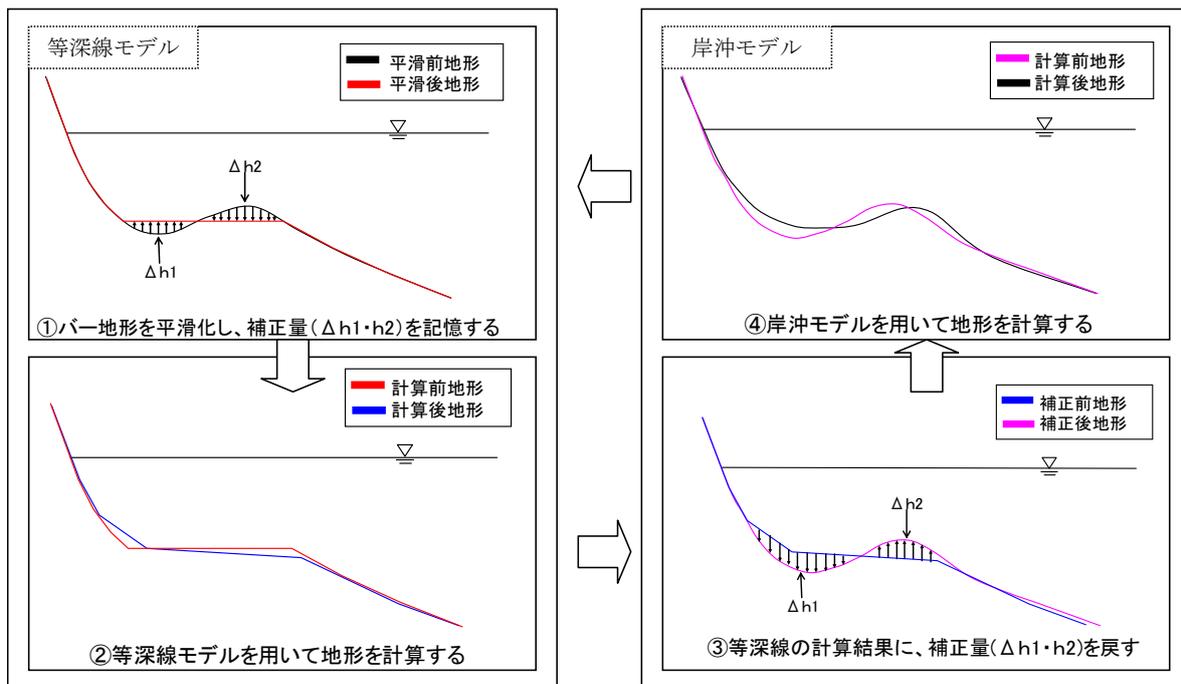


図-8 統合モデルの計算イメージ

## ②粒径

ファンデルワープらの岸沖モデルに考慮されている粒径は、各計算点の中央粒径を用いて算定している。そこで、本研究では、中央粒径のみならず、各計算点に粒度含有率を考慮し、粒径毎に漂砂量を算出した。各計算点で粒度含有率を再度算出し、漂砂量を計算するようモデル改良を行った。

## 5. 岸沖・沿岸漂砂モデルの統合手法

沿岸漂砂は、今まで高知海岸で実績のある等深線モデルを基本とすることとし、岸沖漂砂はファンデルワープらのモデルに改良を加えたモデルとすることとした。漂砂量を沿岸、岸沖モデルにより各々計算し、計算結果を受け渡し、各々の計算の地形に相互に反映することで統合を図ることとした。図-8に計算のイメージ図を示す。

- ① 等深線の断面地形を作成する際、トラフ、バーの量を記憶する。
- ② 等深線モデルにより沿岸漂砂の計算を行い、計算結果である地形を出力する。この時点で、沿岸漂砂による地形を計算する。
- ③ 岸沖漂砂による地形変化の段階であるが、①の記憶量を等深線の計算結果地形に加えることで、岸沖モデルの初期計算地形を作成する。
- ④ ③で作成した地形を対象に岸沖計算を行い、岸沖計算結果地形を得る。この時点で沿岸、岸沖両方の計算が完了する。

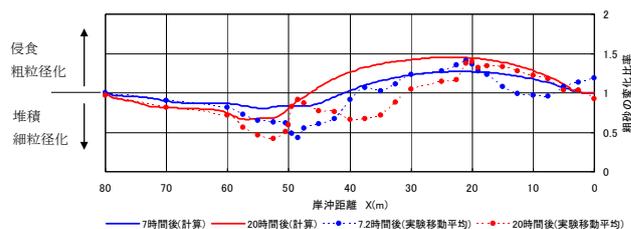


図-9 実験結果の移動平均と計算値の比較

その後、④で得られた地形に対して、①で再び等深線初期地形の補正を行い、計算を繰り返すことで統合とすることとした。受け渡しのサイクルは、地形測量が1年に1回であることから、1年間で1回受け渡すこととした。

## 6. 統合モデルの検証

### (1) 粒径変化の検証

粒径変化の検証は、実験値の変化比率（初期の粗砂割合に対する値、すなわち、各時間での粗砂割合／初期の粗砂割合）が報告されている田中らの実験値<sup>6)</sup>を用いた。今回構築した岸沖・沿岸統合モデルによる計算結果と、田中らの実験値の変化比率を、距離別に示したのが図-9である。図-9の実験値は、前後2つを含めた5個のデータを移動平均している。

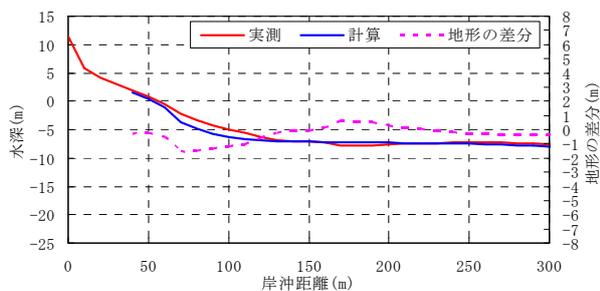


図-10 統合モデルによる検証計算結果  
(長浜工区平均断面 平成8年～平成22年)

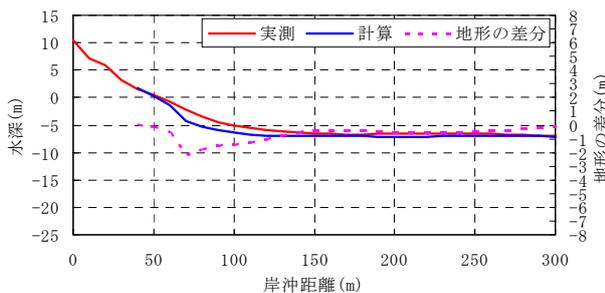


図-11 統合モデルによる検証計算結果  
(戸原工区平均断面 平成8年～平成22年)

図-9から、計算と実験の大まかな傾向は一致しており、特に計算7時間後までは、計算と実験値の傾向（変化比率、侵食、堆積）は一致していることが分かる。

しかし、計算時間が進むにつれ、実験値との差異が見られる。これは、実験に用いた施設が、幅3.4m、深さ6m、長さ205mの造波水路であることから、実験結果には反射波の影響が含まれていると考えられる。また、岸沖計算では、バー頂部のアーミングや浮遊砂のトラフへの落ち込みなどは計算に考慮していないことも影響していると考えられる。さらに、岸沖計算は数年、数十年を対象とした計算であることから、数時間のデータですべてを評価することはできないと考えられる。これらの要因を考慮した結果、堆積・侵食の傾向と、粗砂の変化比率の傾向が一致していることから、適切に粒径の変化計算は実施できていると評価した。

## (2) 断面形状による評価

平成8年を初期地形として、平成22年までの実測有義波高で検証計算を行った。平成22年の実測地形と計算地形について、長浜工区と戸原工区の平均断面を図-10、図-11に示す。

①汀線～離岸距離150mまでの範囲は実測値より統合モデルによる計算値の方が低く計算されており、計算の方がより侵食する傾向であるが、その差は最大2m程度（14cm/年程度）である。

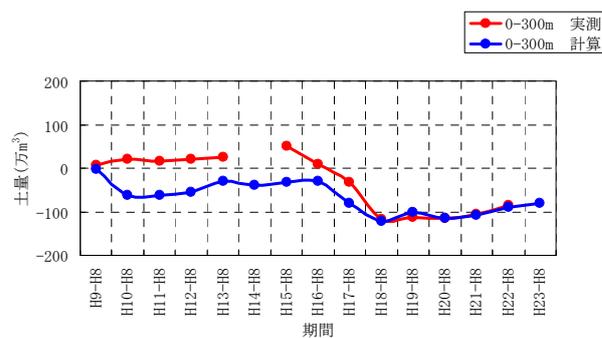


図-12 統合モデルによる検証計算結果  
(長浜工区累積土量 平成8年～平成22年)

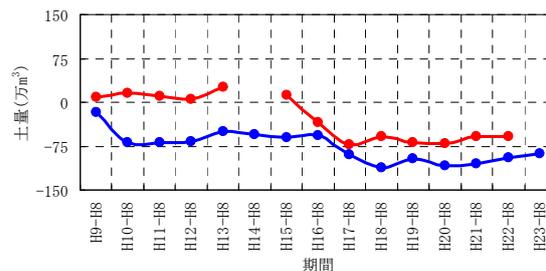


図-13 統合モデルによる検証計算結果  
(戸原工区累積土量 平成8年～平成22年)

②150m～300mの範囲はよく整合しており、最大50cm程度（3.5cm/年程度）の差にとどまっている。

本研究で開発したモデルは、300m以浅の範囲を主眼に整合させており、土砂移動の卓越範囲などを勘案すれば、適切に地形を計算していると評価できる。

## (3) 土量の経年変化による評価

平成8年から、平成22年までの土量変化の実測値と計算結果について、土量累積値を用いて比較し、図-12、図-13に示す。

当該期間においては、戸原、長浜両工区とも75万<sup>3</sup>m程度の侵食である。計算期間全体での土量変化について一致しており、特に平成19年以降、計算と実測値は極めてよく整合した。これは、測量手法が、音響測深器からマルチナローによる測量に変更した時期と重なり、測量精度が向上したことが大きく影響していると考えられる。

## 7. 予測計算

岸沖・沿岸統合モデルを用いて、30年後の地形変化予測計算を行った。

### (1) 計算条件

本研究においては、30年後も現在の海象傾向が続くと想定し、実測データを最大限に用いて計算条件を設定した。計算条件を表-4に示す。

表-4 将来の予測計算条件

項目	計算条件
波高	平成8年～平成23年の2m以上の波高を2回繰り返す
潮位	波高に対応する実測潮位
施設	突堤150m延伸後
養浜量	堤防法線から汀線までの距離が常に70mとなる養浜量

表-5 300m以沖の土砂移動量 (30年後)

(万m <sup>3</sup> )	長浜工区	戸原工区	合計	年平均(万m <sup>3</sup> /年)
土砂移動量	191	203	394	13

## (2) 計算結果

岸沖方向距離300mから、さらに沖に移動する土砂の累積値を表-5に示す。30年間で岸沖方向300mから、さらに沖へ流出する土量は約394万m<sup>3</sup>であり、1年間で約13万m<sup>3</sup>であった。高知海岸に供給される土量（仁淀川からの流出土砂量約10万m<sup>3</sup>/年）との関係から適切な量であり、精度良く再現できたと評価できる。

## 8. 結果

本研究では、次の結論が得られた。

- ①岸沖漂砂は、戸原観測所（高知海岸中央、水深25m）の観測波高（有義波高）で、3m～4mの場合、岸方向へ、4mを越える波高の場合は沖方向に移動することが明らかになった。
- ②高知海岸12kmを対象に地形、変化土量については実測地形と比較し、粒径については実験結果と比較することで検証を行い、モデルの同定を行うことができた。
- ③開発したモデルを用いて予測計算を行った結果、高知海岸から300m以沖に移動する土砂は、今後約13万m<sup>3</sup>/年と予測され、仁淀川からの流出土砂量と比較すると妥当な量であり、精度良く計算できた。

## Development of a cross-shore and alongshore sand transportation integrated model on a cross-shore sand transportation dominated beach

Kanae MATSURIDA and Masaki WASHIDA

This research is to develop the model that evaluates cross-shore and alongshore sand transportation simultaneously: cross-shore and alongshore sand transportation integrated model, aiming to evaluate the size of shore structures and its effect as beach protection on beaches where cross-shore sand transportation is dominated.

To understand the characteristic of topographic change, we focused on the relation between wave height and cross-shore sand transportation. Waves which wave height is over 3 meters provoke cross-shore sand transportation, and its direction is inverted (from onshore to offshore) when wave height is over 4m. To simulate this characteristic, 4 models (SBEACH, Carmen and Magnus., Watanabe et al., and Van der Werf et al.) were tested using observed wave data, and the model developed by Van der Werf et al. showed the best application. In this research, modifications on wave height calculation and grain size were introduced to the Van der Werf model and the model that evaluates cross-shore and alongshore sand transportation simultaneously was developed.

謝辞：本研究をとりまとめるにあたり、国土交通省四国地方整備局高知河川国道事務所のご担当者様より数々のご指導をいただいた。ここに記して深甚なる感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 宇多高明, 河野茂樹：海浜変形予測のための等深線モデルの開発, 土木学会論文集, No.539/II-35, pp.121-139, 1996.
- 2) Magnus, L. and Nicholas C. K. : SBEACH : Numerical model for simulating storm-induced beach change, US Army Engineering Research Center, p.256, 1989.
- 3) Camenen, B. and Magnus, L. : A total load formula for the nearshore, Coastal Sediments, ASCE, pp.56-67, 2007.
- 4) 渡辺晃, 丸山康樹, 清水隆夫, 榊山勉：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回海講論文集, pp.406-410, 1984.
- 5) Jebbe J. van der Werf, Jan S. Ribberink. and Tom O'Donoghue : DEVELOPMENT OF A NEW PRACTICAL MODEL FOR SAND TRANSPORT INDUCED BY NON-BREAKING WAVES AND CURRENTS, Coastal Sediments, pp.1-14, 2007.
- 6) 田中正博, 井上亮, 佐藤慎司, 磯部雅彦, 渡辺晃, 池野正明, 清水隆夫：2粒径混合砂を用いた大型海浜断面実験と粒径別漂砂量の算出, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.551-555, 2000.