

2011年から2019年の24ストームによる 高知海岸南国工区の非定常吹送流・海浜流・ 海浜変形解析

鷲田 正樹¹・室井 直人²・高橋 智幸³

¹ 正会員 セントラルコンサルタント（株）大阪支社（〒530-6012 大阪府大阪市北区天満橋 1-8-30）
E-mail: mwashida@central-con.co.jp (Corresponding Author)

² 正会員 セントラルコンサルタント（株）大阪支社（〒530-6012 大阪府大阪市北区天満橋 1-8-30）

³ 正会員 関西大学教授 社会安全学部（〒569-1098 大阪府高槻市白梅町 7-1）

太平洋に面する高知海岸では、台風の異常波浪による海浜の崩壊と、常時波浪による海浜の再形成作用の両者が均衡する海浜過程特性を有している。本論文では、異常波浪による南国工区の海浜変形に着目して、2011年から2019年の主要な24ストームに対する海岸侵食機構を数値解析する。浅水域での波浪および風による吹送流と、砕波帯内の海浜流で形成される共存場の漂砂モデルを用いて、海浜変形過程を再現する数値解析手法を適用する。モデルの妥当性を確認するために、マルチナロービーム深淺測量の地形変化結果から漂砂モデルの検証とチューニングを行い、改良した海浜変形モデルによるシミュレーションで、計画されている南国工区の漂砂制御工法の実効性が期待できることを示した。

Key Words : beach change simulation, wind-induced and wave-induced currents, wave-current co-existing sediment transport model, cross-shore sediment transport model, Kochi Coast

1. 緒 言

直轄高知海岸では、海岸保全対策を検討するために、長期海浜変形予測を解析する統合モデル¹⁾が構築され、活用されてきた。統合モデルは、エネルギー平衡方程式に基づく波浪変形解析、等深線モデルによる沿岸漂砂量と、戻り流れと波浪の共存場漂砂モデルで岸沖漂砂特性をとり入れた解析方法であるが、多価関数のバー型の地形変化解析が十分でないため、平滑化操作により土砂収支を解析するモデルに留まっている。そのため、52基の離岸堤群と人工リーフが設置されている南国工区の海岸での海浜変形予測には適用限界がある。

本研究では、異常波浪による南国工区の海浜変形（バーの沖方向移動による侵食過程）に着目して、2011年から2019年の主要な24ストームに対する海岸侵食機構を数値解析する。浅水域での波浪および風による吹送流と砕波帯内の海浜流で形成される波・流れ共存場の漂砂モデルで海浜変形過程を再現する数値解析手法を適用する。この海岸ではマルチナロービーム深淺測量が各年に実施されており、海浜変形モデルの検証、改良が可能である。ここでは改良した海浜変形モデルにより、南国工区の海浜変形解析と漂砂制御工法の実効性の評価を行う。

2. 南国工区の海浜変形特性

(1) 高知海岸南国工区の概要

1969年に直轄化された物部川右岸から高知新港に至る南国工区(8.15km)では、52基の離岸堤群と西端部に隣接する人工リーフ1基による侵食対策が講じられている(図-1参照)。人工リーフは越波制御には効果をあげているが、周辺では安定した海浜が形成されておらず、東第一防波堤北側の航路には土砂堆積が生じるなど漂砂環境の劣化が生じている。また、人工リーフ沖側端部では洗堀による基礎工の被災が生じ、洗堀防止マットなどの対策が講じられている。人工リーフの漂砂制御機能を強化するために、これを離岸堤化することが計画された。

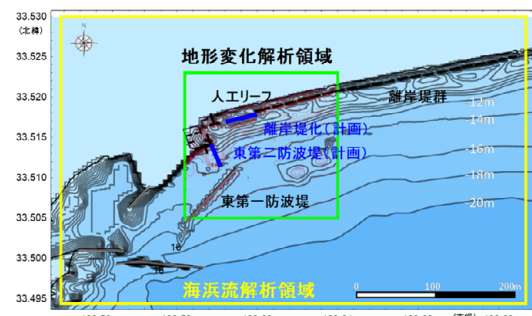


図-1 高知海岸南国工区の構造物配置と解析領域

(2) 波浪による沿岸漂砂量の時系列特性

土佐湾沿岸の波浪は北西太平洋で発生した台風、熱帯低気圧により支配されている。高知海岸では、図-2 に示すように、台風の位置により侵入する波浪の波向きが異なり、湾の西側を通過する台風では東向き漂砂を、接近台風では西向き漂砂を発生させ、紀伊半島より東側を通過する台風の影響は小さい。気象庁の沿岸波浪数値予報モデル GPV (3 時間間隔) より、南国工区の沖波特性を与え、浅水変形とスネルの法則での屈折計算を行い砕波波高および波向きを計算し、CERC 公式で 2008~2019 年の 3 時間毎の沿岸漂砂量の時系列を作成すると図-3 を得る。図中赤字で表示した台風は西向き (－) 漂砂を発生させ、黒字は東向き (+) 漂砂を発生させる台風である。台風により急激に沿岸漂砂量が発生する。また、常時波浪による沿岸漂砂量も無視できず、接近台風が無い期間でも、定常的に東向き漂砂を発生させる営力が作用している海岸であることがわかる。

(3) マルチナロービーム測深結果の侵食・堆積特性

南国工区では 2009 年から 2012 年を除く各年の 11、12 月に水深 20 m 以浅の領域でマルチナロービームによる測深が実施されている。このデータは海浜変形過程を理解する上で極めて有用な情報を提供してくれる。図-4 に測深結果から作成した年単位の侵食・堆積図の一

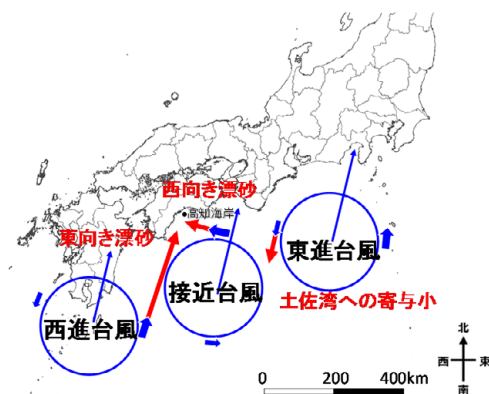


図-2 土佐湾の波浪・沿岸漂砂と台風経路



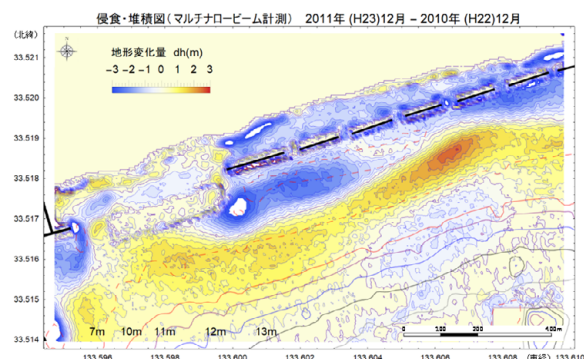
図-3 CERC 公式で推定した南国工区沿岸漂砂の時系列特性

例を示す。図-3 に示した襲来台風と沿岸漂砂特性から分かるように、海浜変形に大きな影響を与えた台風が連続して発生した 2011 年と 2019 年には、水深 7 m 付近の領域に土砂が流出し、顕著な沿岸バーが形成されている (図-4 (a) と図-4 (b))。

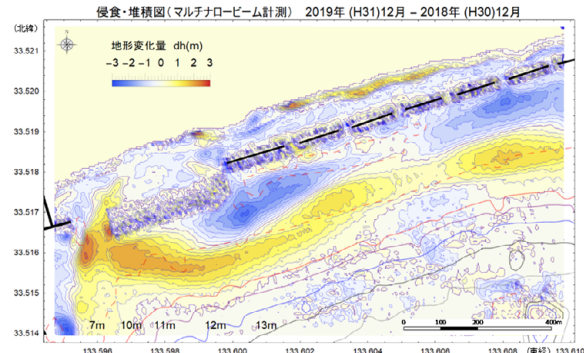
一方、接近台風の無い 2017 年では、図-4 (c) に示すように、常時波浪によって離岸堤前面の侵食部分を埋めるようなバー移動が生じて海浜を復元している。ただし人工リーフの沖ではこの海浜の修復効果が見られず、西端部では沖方向への流出土砂が確認できる。

2011 年と 2019 年の海底地形からも、明確に西端部の土砂の沖方向への流出が確認できる。流出は東防波堤が延伸された 2010 年以降顕著になり、常時波浪によっても人工リーフ背後からの土砂の沖方向移動が認められる。

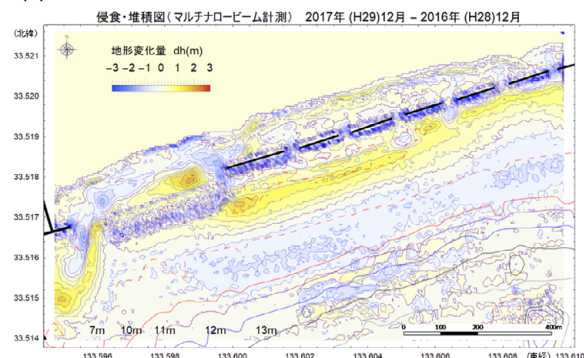
論文中の図は見やすさを優先し、凡例の値を超える量については、白抜きとして表示している。



(a) 2010 年～2011 年の侵食・堆積 (台風による侵食)



(b) 2018 年～2019 年の侵食・堆積 (台風による侵食)



(c) 2016 年～2017 年の侵食・堆積 (常時波浪の堆積)

図-4 マルチナロービーム測深の年間侵食・堆積

3. 数値モデル

常時波浪による復元過程は重要な解析ターゲットではあるが、本研究では台風による南国工区の侵食過程に着目して、これを数値解析で再現することを試みる。

(1) 波浪・吹送流・海浜流場

数値モデルでは、外洋波浪を気象庁の波浪 GPV で与え、第三世代の浅海域波浪モデル SWAN による波浪解析で吹送流、海浜流の駆動力を求め、これによって海洋モデル POM で準 3 次元または平面 2 次元の流れを解析する。波浪場と流れの駆動力の詳細は、高潮再現計算を行った Tanaka et.al²⁾で参照できる。風による吹送流を解析する場合、風速の 2 乗則で海面せん断応力を与える方法が一般的であるが、波浪が流れ場に与える影響が陽的に記述できない。また、外洋での radiation stress は勾配の解像度が十分取れないため、吹送流の駆動力として使用することは難しい。ここでは、近年の高潮解析で用いられている、白波砕波せん断応力から流れを発生させ海面せん断応力を求める方法を使用して吹送流場を解析した。吹送流が漂砂移動に及ぼす影響は、田中ら³⁾の石川海岸での観測、馬場ら⁴⁾の大潟海岸での観測で水深 30m 辺りまで漂砂を発生させる吹送流（ほぼ一様の鉛直分布）が発生していることが明らかにされ、山下⁵⁾は強風作用時の海浜変形予測には砕波帯内の戻り流れ、沿岸流に加えて風によって発生する砕波帯外の吹送流を考慮した流れ場を考慮することの必要性を指摘している。

一方、砕波帯内では radiation stress 勾配により海浜流の駆動力が求められるため、海洋モデル POM により準 3 次元の流れ場を解析することができるが、砕波帯内の海浜流解析には、砕波による乱流エネルギー生成項を考慮する等の乱流モデルの改良が必要で、平面 2 次元解析では、底層流に戻り流れの影響を考慮した解析が必要である。南国工区の海岸では、高波浪時に沖方向に移動する土砂量は、平面 2 次元、準 3 次元の数値解析結果よりかなり沖まで運ばれている。この原因として、離岸堤群による反射の影響が考えられるが、現時点ではこれをモデルに取り込むことができていないため、本研究では、測深結果を再現することを第一目標として、平面 2 次元で戻り流れの強度を調整する方法を用いた。

(2) 漂砂モデル・海浜変形

波浪場、吹送流・海浜流場の解析結果を用いて、波・流れ共存場の漂砂量を求め水深変化解析を行うことが可能である。本研究では、流れ場は平面 2 次元解析として戻り流れを別途考慮することで、田中ら⁹⁾が用いた波・流れ共存場の漂砂量則を適用した。このモデルは、統合モデルで岸沖漂砂モデルに用いられている Van der Werf

モデル⁷⁾であるが、ここでは等深線モデルの沿岸漂砂量ではなく、平面 2 次元の吹送流・海浜流と戻り流れを合成した流れと波浪の共存場の漂砂モデルとしている。

4. 非定常吹送流・海浜流・海浜変形解析

3 時間間隔で再解析されている気象庁の波浪 GPV を外洋波浪として与え、風による吹送流と砕波帯砕波による海浜流を 1 時間毎に更新する非定常計算を行う。

(1) 計算領域と主要 24 ストームの選定

外洋波浪の諸元から、有義波高の二乗 $H_{1/3}^2$ と有義波周期 $T_{1/3}$ でエネルギーフラックス相当パラメータ EF を定義し、EF が閾値 90 を超える状態が 24 時間以上継続する 35 ケースを抽出し、そのうち海浜変形に影響を与えると考えられる表-1 に示す 24 ケースを主要ストームとして選定した。

(2) 吹送流・海浜流場

吹送流・海浜流の解析は、図-1 に示す解析領域で、波浪解析領域（約 50 m メッシュ）にネスティングした波浪・海浜流解析領域（約 10m メッシュ）とその内側の海浜変形解析領域の 3 領域である。

(3) 平面 2 次元海浜流+戻り流れによる漂砂量解析

POM の準 3 次元計算を長期間の海浜変形の流れ場として解析するには計算負荷が大きい。また、離岸堤の反射による地形に対する影響を適切に表現できない。ここでは、平面 2 次元計算に砕波帯内で形成される戻り流れを考慮することとし、次式で示される戻り流れ流速成分 (U_{udx} , U_{udy}) を、POM の平均流速成分に足し合わせて底面流速場を計算し漂砂量モデルに適用する。

$$U_{udx} = -\frac{a}{h-\frac{H}{2}} \left(\frac{gH^2}{8C} + \frac{\pi H^2}{4T} \right) \cos(\pi - \theta) \quad (1)$$

$$U_{udy} = -\frac{a}{h-\frac{H}{2}} \left(\frac{gH^2}{8C} + \frac{\pi H^2}{4T} \right) \sin(\pi - \theta) \quad (2)$$

ここに θ は波向き、 h は水深、 H は波高、 T は周期、 c は波速、 a は戻り流れの強さを調整する係数で、本計算では高波浪時の沖方向漂砂によるバーの沖方向移動・位

表-1 選定した主要 24 ストームと作用時間

年(台風)	作用時間	年(台風)	作用時間
2011_(T1106)	69h	2014_(T1411)	96h
2011_(T1112)	81h	2014_(T1418)	45h
2011_(T1106)	33h	2014_(T1419)	60h
2011_(T1115)	30h	2015年7月熱低	63h
2012_(T1210)	33h	2015_(T1511)	75h
2012_(T1214)	63h	2015_(T1515)	51h
2012_(T1216)	42h	2018_(T1820)	33h
2013_(T1318)	21h	2018_(T1821)	33h
2013_(T1326)	30h	2018_(T1824)	27h
2013_(T1327)	36h	2019_(T1910)	60h
2014_(T1408)	81h	2019年9月熱低	24h
2014_(T1411)	27h	2019_(T1914)	48h

置が再現できるよう調整した結果、 $\alpha=5$ を採用した。

図-5に戻り流れを考慮せずに海浜変形を計算した場合の地形変化（上：侵食・堆積図）と計算期間中の漂砂量ベクトルの総和（下）を示す。波浪による岸向き漂砂が卓越するため、沖側の土砂を岸方向に運搬し、離岸堤群前面に堆積している様子がわかる。離岸堤背後での漂砂量は極めて少なく、離岸堤の内側で土砂移動は皆無である。戻り流れを入れない場合は波浪による岸方向漂砂が卓越し、台風の襲来が無かった2017年の侵食・堆積、図-4(c)に近い堆積形状になっている。図-6には戻り流れの効果を考慮できるPOMの準3次元計算を実施した場合の海浜変形と全作用時間内の漂砂量ベクトル総和を示す。離岸堤群の沖側を西方向に流れる漂砂が再現できており、対応する2011年の測深結果である図-4(a)に近い地形変化特性が計算されている。以上の結果から、平面2次元海浜流場を用いる海浜変形計算では戻り流れによる沖方向漂砂を考慮する必要がある事がわかる。

(4) 漂砂・海浜変形解析結果

ここでは、解析対象期間中の高波浪来襲時の2011年および2019年の漂砂・海浜変形計算結果を示す。

a) 2011年の3ストームの解析結果

2011年は台風6号、12号、15号の来襲があり、バーの沖方向移動が発生している。測深結果の図-4(a)に近い海浜変形を再現するため、戻り流れを入れた作用時間213hrの結果を図-7に示す。準3次元計算の場合よりは強めの沖方向漂砂が計算され、人工リーフ沖側に集中した堆積が計算されている。測深結果は人工リーフ沖側の堆積土砂は水深10m以深まで沖側に分散しているが、こ

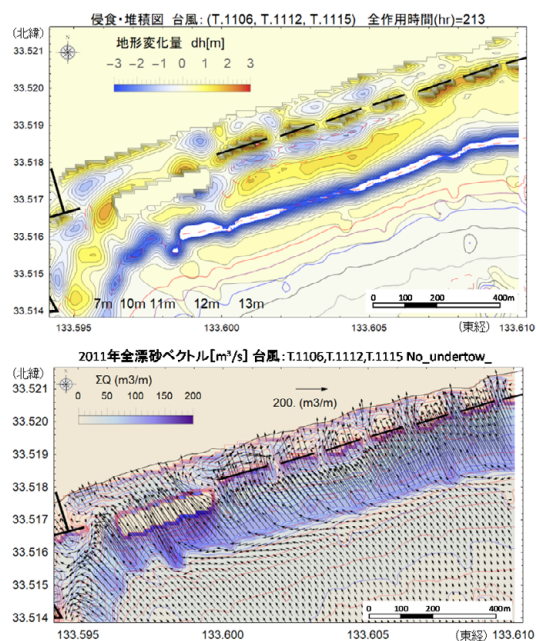


図-5 平面2次元海浜流・波浪共存場で解析した2011年の海浜変形（上）と全漂砂ベクトルの総和（下）

の現象は再現できていない。また離岸堤群の沖の堆積（バー形成）の形状も若干異なるのは、離岸堤からの反射波の影響も含まれていると考える。

b) 2019年の3ストームの解析結果

2019年も、測深結果の図-4(b)に示すように、強い西向きの漂砂を発生させる台風10号、17号、19号が沖方向土砂移動を発生させており、これを再現するために2019年の3ストームに対して解析を行った。

海浜変形と漂砂量ベクトル総和の解析結果を図-8に示す。バーの形成位置と高さはほぼ再現できているが、測量結果で示されている人工リーフ西側での顕著な堆積やは再現できていない。

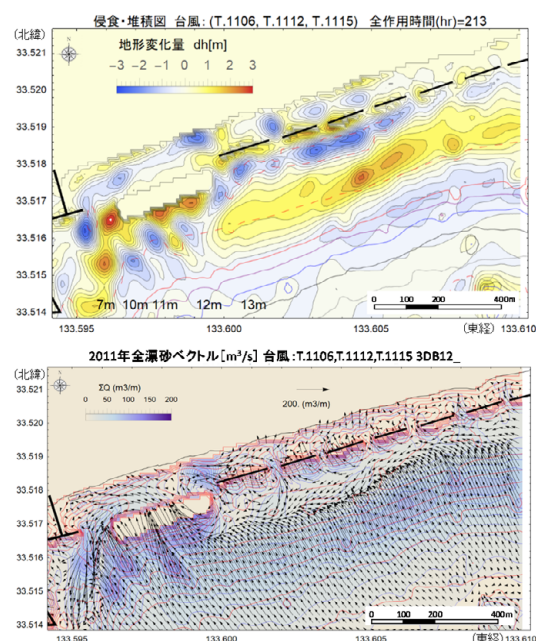


図-6 準3次元海浜流（6層）・波浪共存場で解析した2011年の海浜変形（上）と全漂砂ベクトルの総和（下）

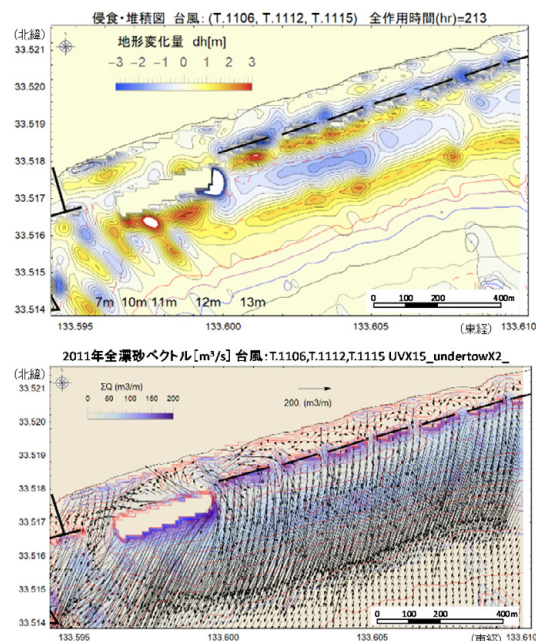


図-7 戻り流れを考慮した海浜流・波浪共存場で解析した2011年の海浜変形（上）と全漂砂ベクトルの総和（下）

c) 侵食・堆積土砂量の岸沖総和

2011 年と 2019 年の結果を岸沖方向の全土砂量の沿岸方向分布特性を見るため、汀線から計算領域南端部まで、緯度方向に侵食・堆積土砂量を積分した、岸沖総和を求め、図-9 に示した。2012 年から 2018 年の間は地形変化量が小さいので、1 枚の図にまとめて示した。図中の赤線は測深結果から得られた 1 年間の侵食堆積データから求めた侵食（－）堆積（＋）の緯度方向の岸沖総和で、黒い線が 3 台風の計算結果である。人工リーフ周辺の侵食・堆積量のピーク値は概ね再現できているように見える。測量は 12 月に実施されており、常時波浪による埋戻し等が生じた地形であるが、解析ではストーム時だけを抽出して地形変化を計算している。このため、両者を直接比較することにはできないが、人工リーフ周辺海域での堆積が顕著で全体的な地形変化の傾向と侵食堆積量のオーダーはほぼ再現できているように見える。

d) 離岸堤化・東第二防波堤の効果

南国工区の海浜保全の案として、人工リーフの離岸堤化が示されている。さらに、港湾区域でも湾内静穏度を維持するための東第二防波堤の建設が計画されている。これらの構造物が海浜変形に及ぼす影響を調べるため港湾域を含む範囲で、人工リーフ（現況）、離岸堤化、離岸堤化＋東第二防波堤設置の 3 ケースについて海浜変形解析を行った。図-10 に 3 ケースに対する侵食・堆積図および地形変化量の岸沖総和の沿岸分布を示した。図中に全変化土砂量(Total)と沿岸方向に分割した区間の総土砂量(m^3)を示した。構造物設置条件の相違で全土砂量が若干変化しているのは、流れの場が変化し、東側側方境界から侵入する土砂と西側開境界から流出する土砂量が

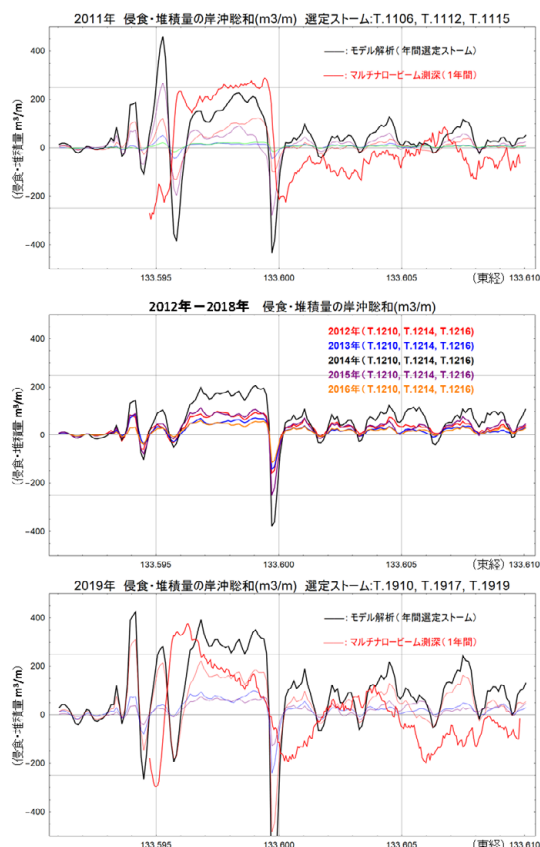


図-9 年間の侵食・堆積土砂量の岸沖総和 (m^3/m) 2011 年と 2019 年は図-4 のマルチナロー測深結果 (赤) とも比較

変化するためであると考えている。人工リーフの離岸堤化により、2011 年の外力時にリーフ沖側のエリアでは $23,000 m^3$ から $35,000 m^3$ へ約 $12,000 m^3$ の堆積改善効果（60%増）がある。また、航路部への土砂流出については $400 m^3$ ではあるが、流出改善効果（15%減）が認められる。離岸堤化に加えて東第二防波堤を延伸した場合は、流出をさらに約 $1,400 m^3$ 抑止できる。人工リーフのみの場合と比較し流出を約 40%に減じる効果が期待される。

5. 結 語

本研究で得られた成果は以下のようである。

- 1) 高知海岸南国工区の海浜変形は接近台風による西方方向漂砂と、戻り流れによる沖方向土砂移動で発生するバーの沖方向移動で特徴づけられる。この海岸の常時波浪は沖のバーの土砂を岸方向に回復させる十分な波浪の営力を有している。
- 2) 主要ストームに対して、吹送流・海浜流場に戻り流れを考慮することで、波・流れ共存場の漂砂量モデルによる海浜変形解析でストーム時の海岸侵食の過程、機構を再現できることを示した。

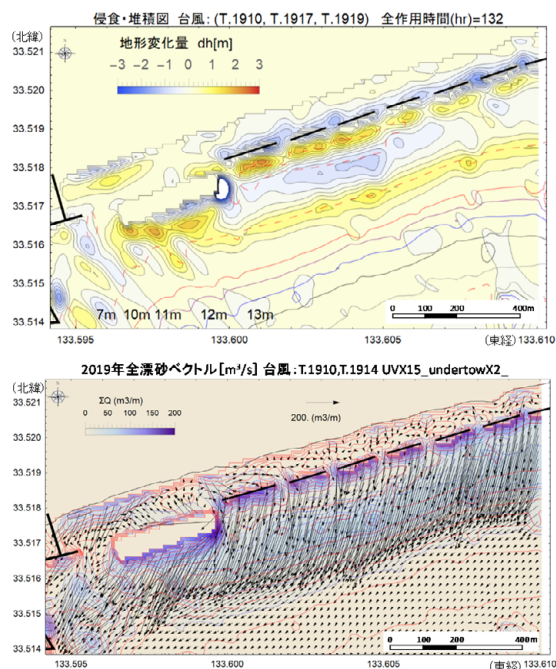


図-8 戻り流れを考慮した海浜流・波浪共存場で解析した 2019 年の海浜変形（上）と全漂砂ベクトルの総和

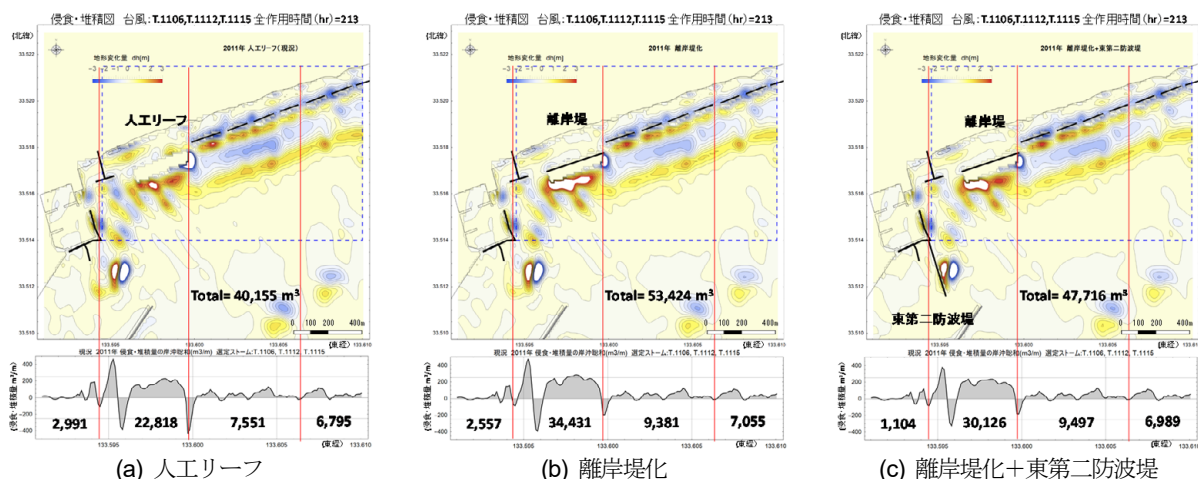


図-10 離岸堤化および東第二防波堤築造の場合の海浜変形の影響 (2011 年の場合) 図中に岸沖変化土砂量を数値で表示

3) 南国工区に計画されている海岸保全対策である人工リーフの離岸堤化は、西方向漂砂を低減しリーフ周辺海域での土砂堆積を促進する効果が見込まれる。また、港湾区域に計画されている東第二防波堤の設置も静穏度の維持のほか、港湾への土砂流入を減少させる効果が見込まれる。

謝辞：本研究の数値モデルの構築、運用および深浅測量データ解析において、山下隆男広島大学名誉教授のご指導とご協力を賜りました。また、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より、多くの有益なご指摘、指導を頂きました。心より謝意を表します。

参考文献

- 1) 祭田佳奈江, 鷺田正樹: 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, 海洋開発論文集, 68 巻 2 号, p.I_612-I_617, 2012
- 2) Kazuhiro TANAKA, Masaki WASHIDA, Yoshihiro NISHIUKE, Tetsuya HIRAISHI: Numerical Simulation of Storm Surges and Waves Caused by Typhoon Jebi in Osaka

Bay with Consideration of Sudden Change of Wind Field, *Journal of Natural Disaster Science*, Volume 40, Number 2, pp44-68, 2020

- 3) 田中茂信, 佐藤慎司, 川岸眞一, 石川俊之, 山本吉道: 石川海岸の沖合における漂砂機構, 海岸工学論文集, 第 43 巻, 551-555, 1996
- 4) 馬場康之, 加藤 茂, 木原直人, 山下隆男: 広域海浜流の観測と定式化, 京都大学防災研究所年報, 第 45 号 B-2, 459-465, 2002
- 5) 山下隆男: 海浜保全論, 水工学シリーズ 11-B-1, 土木学会, 1-1~1-20, 2011
- 6) 田中和広, 山部道, 平石哲也: 人工リーフ周辺の波浪変形・3次元海浜流・海浜変形の数値解析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学) Vol.74, No.2, pp.I_937-I_942, 2018
- 7) Van der Werf, J.J., J.S. Ribberink and T. O'Donoghue: Development of a new practical model for sand transport induced by non-breaking waves and currents. *Coastal Sediments '07*, ASCE, 42-55, 2007

(Received February 4, 2021)

(Accepted April 23, 2021)

NON-STATIONARY ANALYSIS OF WIND-DRIVEN, NEARSHORE CURRENTS AND BEACH EROSION CHANGES IN NANGOKU CONSTRUCTION AREA OF KOCHI COAST CAUSED BY 24 STORMS FROM 2011 TO 2019

Masaki WASHIDA, Naoto MUROI and Tomoyuki TAKAHASHI

The Kochi coast facing the Pacific Ocean has a beach process characteristics in which the beach collapse due to abnormal typhoon waves and the beach reforming due to normal wave power are balanced in the erosion-deposition phase changes. In this paper, we focus on the erosion phase of the beach changes in the Nangoku construction area of Kochi coast due to abnormal wind and waves. A numerical analysis was conducted to reproduce the coastal erosion mechanism for the 24 major storms from 2011 to 2019. The beach change process is simulated with a sediment transport model formed by wave-current coexisting model in shallow water where the offshore sediment transport caused by undertow can't be neglected. The developed sediment transport model is tuned from the results of topographical changes in multi-narrow beam depth sounding surveys. The effects of beach protection measures of the Nangoku construction area was evaluated from the point of view of sediment control by the coastal structures scheduled.