

高波浪に伴う沖の細砂堆積域での地形変化と掘削による汀線後退の機構

Changes in Offshore Seabed Composed of Medium and Fine Sand Associated with Storm Waves and Shoreline Changes due to Offshore Mining

諏訪義雄¹・山田浩次²・宇多高明³・宮原志帆⁴・芹沢真澄⁵・石川仁憲⁶

Yoshio SUWA, Koji YAMADA, Takaaki UDA, Shiho MIYAHARA
Masumi SERIZAWA and Toshinori ISHIKAWA

The Kochi coast formed by the fluvial sediment supply from the Niyodo River has been eroding and the water depth immediately offshore of the shoreline has increased, resulting in increase in the damage potential against wave run-up. The beach changes of this coast were investigated using the bathymetric survey data along with the grain size analysis of the seabed material. On the basis of these field data, the mechanism of increase in water depth owing to the offshore sand movement associated with the storm waves and offshore sand mining were analyzed using the contour-line-change model.

1. まえがき

土佐湾に面した高知海岸においては、過去東向きの沿岸漂砂が卓越し、仁淀川からの流出土砂が東向きに移動し、堆積して海浜が形成されてきた。しかし仁淀川河口の東2kmにある文庫鼻に隣接して春野漁港の防波堤が延ばされて沿岸漂砂が阻止されるとともに、仁淀川河口沖を中心とする広域で砂利採取のための海底掘削が行われたため、掘削穴への砂の再堆積のために仁淀川からの流出土砂がトラップないし河口方面へと逆流した結果、東向きの沿岸漂砂が枯渇状態となった(宇多, 1997)。このため現況では文庫鼻を越えて新たな土砂供給がほとんどない状態となった。下手側への沿岸漂砂の流出がなければ、通常こうした条件下でも海浜は安定化に向かうはずであるが、高知海岸では近年でも地形変動が大きく、汀線前面水深の増大が起き、波のうちあげ高の増大など、防護上の問題が起きている。沿岸漂砂バランスに起因する諸問題は、ほとんどの場合その予測が可能となってきたが、高知海岸で近年起きている汀線沖での急深化については、その機構が十分明らかではなく、有効な対策の立案のためにはその機構解明が望まれている。本研究では、徐々にポケットビーチ化しつつあるにもかかわらず

急激な沖向き漂砂が起きて前面水深が増大する機構について現地実測データと粒径を考慮した等深線変化モデルにより検討する。

2. 高知海岸の断面構成と縦断形変化

高知海岸(戸原・長浜工区)では、図-1に示すように桂浜から春野漁港まで7km区間において間隔200mで33測線が配置され、これらの測線に沿って縦断形が測定されてきた。図-2に、図-1に示す区域をほぼ三等分し、かつ春野漁港に近接する部分では防波堤等による影響が含まれる可能性があることから除いた、No.29-5, No.29-16, No.29-24の3測線における2000～2008年の縦断図を示す。このうち、No.29-5とNo.29-24については、1995年の底質材料調査による d_{50} を合わせて示した。1995年の底質材料調査結果は d_{50} しか残っておらず、材料の内訳がわからない。そこで、2010年3月にNo.29-24において、水深1mおきに底質材料を採取し、水深方向の粒度分布を測定した。図-3に結果を示す。図-2, 3から、この区間の縦断形は汀線付近の浅海部(2003年1月では水深4m程度まで、2006年1月では水深6～8m程度まで)の急な前浜斜面は粗砂・礫が、それより深い沖浜緩斜面は中砂が主体となって構成されており、沖浜緩斜面では水深が増すほど細砂の含有率が増える。図-2から読み取れる地形変化の限界水深14～15mより深い水深16m以深では75%以上細砂で覆われており、水深帯に応じて海底面を構成する粒径が大きく異なることが分かる。

図-2の断面地形変化からは、以下が読み取れる。2003年にはいずれの測線でも中砂細砂の緩斜面沖浜が勾配1/30のフラットな斜面であったが、2006年までにいずれの断面でも中砂細砂が沖向きに移動し、沖合にバーが形

1 正会員	国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部海岸研究室長
2 正会員 工修	国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部海岸研究室
3 正会員 工博	(財)土木研究センター常務理事 なぎさ総合研究室長兼日本大学客員教授 理工学部海洋建築工学科
4 正会員	海岸研究室(有)
5	海岸研究室(有)
6 正会員 工修	(財)土木研究センターなぎさ総合研究室



図-1 高知海岸の測線位置と被災箇所

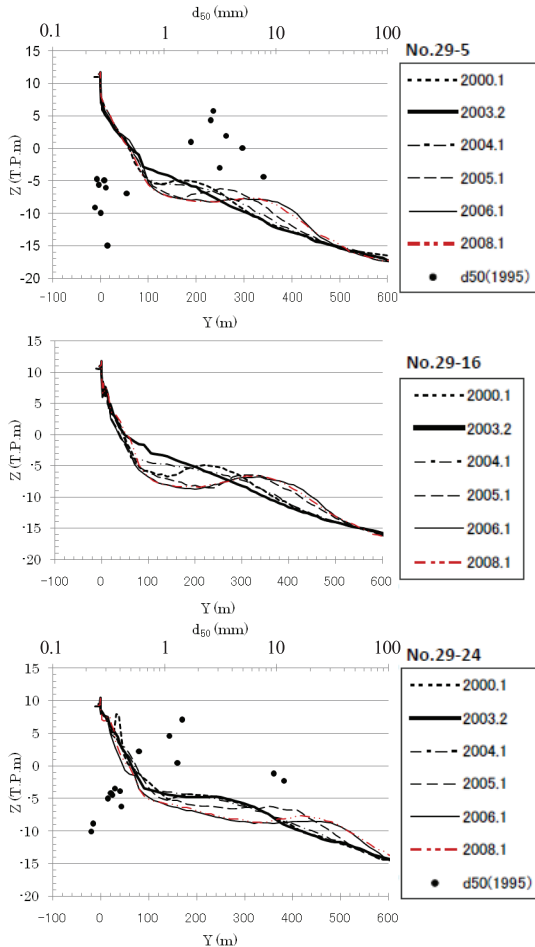


図-2 海浜縦断形の変化（測線No.29-5, No.29-16, No.29-24）

成され、2008年においても形状に大きな変化はない。このような2000～2008年の縦断変化では各断面で土砂収支がほぼ取れていたこと、縦断形変化が互いにほぼ相似形であり、かつ例示した3測線は高知海岸をほぼ代表する位置から選ばれていることを考慮すれば、この期間において高知海岸の大部分の区域で岸沖モードの地形変化が起きたと考えられる。また2006年にはバーが沖合に移動したように見えるが、その際のバーの比高は小さく、ほぼ平坦と見なすことが可能であろう。沖浜緩斜面で著しい地形変化が生じている時期においても粗砂・礫で構成された急勾配の前浜斜面では地形変化が小さい一方、

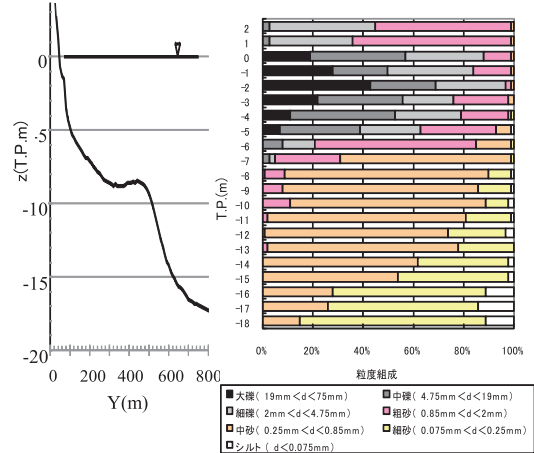


図-3 No.29-24の底質粒度組成の水深分布（2010.3）

前面水深が3～4mから6～8mへと大きくなった。

次に、粒径と海底勾配の関係を調べるために、図-2の縦断形をもとに、測線No.29-5とNo.29-24において、水深0～5m間と水深5～15m間で平均海底勾配を求めると、No.29-5では1/10と1/30、No.29-24では1/8と1/30となって粒径分布に応じ前浜勾配は急であるが、沖浜勾配は緩くなる。また海浜を構成する材料の相違から判断して、ほぼ-4mを境としてこれ以浅と以深では土砂のやり取りがほとんどなく、沖合でのバーの形成は中砂細砂の移動に起因すると考えられる。

3. 縦断形変化がもたらす防護機能の低下

2003年2月から2006年1月までの中砂細砂からなる沖浜斜面の地形変化の後、戸原・長浜市区では2005年9月の台風14号と2007年8月の台風5号襲来時、図-1に示す3箇所でも構造物の被災が起きた。2005年9月にはNo.29-16付近で消波工が沈下し、またNo.29-24付近ではヘッドランドのケーソン周辺階段工の沈下・散乱が起きた。また2007年8月にはNo.29-11付近で基礎捨石工の沈下が起きた。

これらの構造物災害と中砂細砂で構成された沖浜緩斜面の地形変化との関連を考察するため、地形変化が碎波位置、うちあげ高に与える影響を検討した。消波工の沈下が見られた測線No.29-16において、2003年2月と2006年1月の断面形と波高を与え波形勾配H/Lを0.03に保って碎波点とうちあげ高を計算すると、沖合緩斜面での断

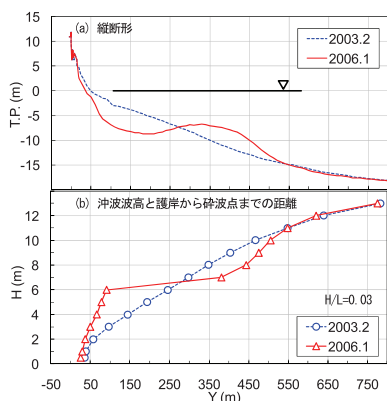


図-4 断面形の違いによる砕波位置の変化

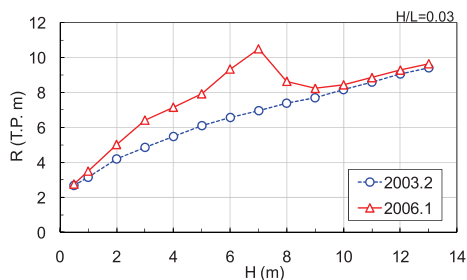


図-5 断面形の違いによる波のうちあげ高Rの変化

面変形により波高6m以下の条件では砕波位置が大きく堤防に近づき、波高6mでは砕波点が約200m岸に接近し、堤防からの距離が100m以内となった（図-4参照）。またうちあげ高はいずれの波高条件でも断面変形前より変形後が高まり、とくに沖波波高7mで極大となり変形前の1.4倍以上となった（図-5参照）。このように汀線沖での急深化は波浪災害ポテンシャルの増大に結びついている。

4. 沖向き漂砂の発生と波浪条件の関係

2.で述べたように高知海岸における2000～2008年に起きた地形変化は、断面内で土砂収支がほぼ成立し、沿岸モードの地形変化（例えば対象地区の東部で堆積、西部で侵食）を含まないことから、主に岸沖漂砂による地形変化が卓越したと考えられる。その外力となるのは波浪作用である。そこで縦断形変化の起きたと同じ2000～2008年における外力条件の変化を調べた。図-6は高知海岸沖の戸原波浪観測所における2000～2008年の有義波高の経時変化を示す。期間中には4mを越える高波浪が数回来襲しているが、このうち2004年8月27日～29日は最大有義波高が $H_{1/3}=7\text{m}$ で、4m以上の有義波高の継続時間が63時間、5m以上では27時間の波が襲来した。8月29日19時以降が欠測であったことから、実際にはさらに長時間高波浪が作用したと考えられる。また2005年9月

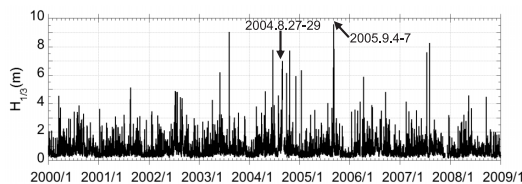


図-6 高知海岸における有義波高の経時変化（戸原波浪観測所）

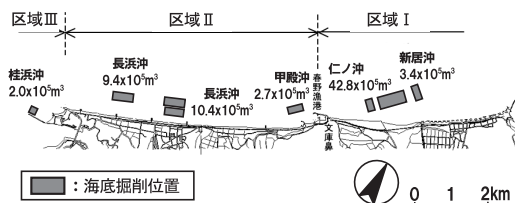


図-7 海底掘削の位置

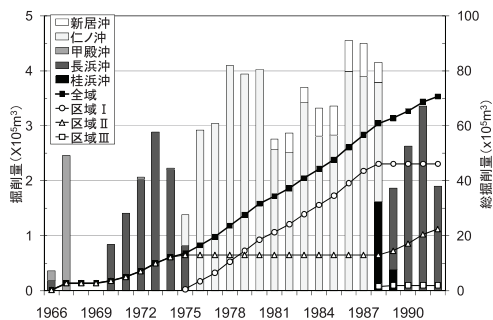


図-8 海底掘削の許可掘削量

4日～7日にも最大有義波高が $H_{1/3}=9.5\text{m}$ で、4m以上の有義波高の継続時間が90時間、5m以上では64時間の高波浪が襲来した。

この観測結果によれば、沖浜緩斜面を形成する中砂細砂の沖向き移動には高波浪の作用とともに、波浪の継続時間も密接に関係すると推定される。2002年から2004年8月まではこのような継続時間の長い高波浪の作用がなかったが、その期間では測線No.29-5の縦断形変化において中砂細砂の沖合への移動はなく一様勾配に近かった。しかし2004年8月27日の台風16号と2005年9月4日の台風14号の作用後には中砂細砂の沖合への移動が起きた。

5. 砂利採取のための海底掘削

図-7に示すように高知海岸では1966～1992年の27年間、沖合で砂の採取が行われてきた。海底掘削量は総計で $7.1 \times 10^6\text{m}^3$ に達した。図には地先海岸沖ごとの掘削土砂量が示されている。高知海岸の沿岸漂砂の卓越方向は東向きであり、過去は仁淀川からの流出土砂が東向きに移動していたが、現況では文庫鼻に隣接して春野漁港の防波堤が延びており、そこで汀線付近での沿岸漂砂は阻止されている。また仁淀川沖で大規模な海底掘削が行わ

表-1 計算条件

数値計算手法	粒径を考慮した等深線変化モデル (熊田ら, 2003)
計算ケース	1 $h_c=7.5\text{m}$ 2 $h_c=9.5\text{m}$ 3 $h_c=14.5\text{m}$ 4 掘削
代表粒径と平衡勾配	代表粒径 (2粒径) と平衡勾配 粒径1: 細粒, 代表粒径 $d_1=0.2\text{mm}$ 常時平衡勾配 $\tan\beta_{c1}=1/30$ 高波浪時平衡勾配 $\tan\beta_{c1}=1/100$ 粒径2: 粗粒, 代表粒径 $d_2=2\text{mm}$ 常時平衡勾配 $\tan\beta_{c2}=1/10$ 高波浪時平衡勾配 $\tan\beta_{c2}=1/10$
初期地形	くの字型断面 (水深4m 以浅1/10, 水深4m以深1/30)
初期粒径の含有率	$z=+4\sim-4\text{m}$: 細粒 $\mu_1=0$, 粗粒 $\mu_2=1$ $z=-5\sim-20\text{m}$: 細粒 $\mu_1=1$, 粗粒 $\mu_2=0$
入射波条件	砕波波高 $H_b=4\text{m}$
漂砂量係数	沿岸漂砂量係数 $K_s=A/\sqrt{d}$ 係数 $A=1.0$ 岸沖漂砂量係数 $K_s=0.01 K_x$
沿岸・岸沖漂砂の水深分布	宇多・河野 (1996) の3次式
限界水深・バーム高	波による地形変化の限界水深 h_c $h_c=7.5\text{m}$ (ケース1) $h_c=9.5\text{m}$ (ケース2) $h_c=14.5\text{m}$ (ケース3, 4) バーム高 $h_R=4.5\text{m}$
土砂落ち込み限界勾配	陸上1/2, 水中1/3
交換層の幅	$B=10\text{m}$
計算等深線範囲	$Z=+5.5\text{m}\sim-20.5\text{m}$
計算メッシュ	$\Delta Z=1\text{m}$
計算時間ピッチ	$\Delta t=0.1\text{hr}$
計算ステップ数	10000 ステップ
境界条件	岸沖端: $q_z=0$ (漂砂の流入出なし)

れた後、砂が河口方面へと逆流したこと (宇多, 1997) を考慮すれば、文庫鼻以東と以西での土砂交換量はほとんどなく、春野漁港を境に東西の漂砂系は切れていると考えられる。同様に桂浜を境に東西で漂砂系が切れていると考えられる。このことから、文庫鼻以西の地域をI、桂浜から文庫鼻の地域をII、桂浜沖をIIIとして、各区域での総掘削量を図-8に示す。1966年以降の全体掘削土砂量は $7.1 \times 10^6 \text{m}^3$ であるが、うち区域Iが $4.62 \times 10^6 \text{m}^3$ と多く、区域IIでの総掘削量が $2.25 \times 10^6 \text{m}^3$ でありこれに次ぐ。これらと比べて区域IIIの掘削量は小さい。いま高知海岸の桂浜から春野漁港まで7kmの区域IIの変化に着目し、区間の岸沖方向に約350mの海底面の一様な低下を招いたとすると、海底地盤の低下量は0.92mとなる。また区域IIでの掘削は1970-1974年と1989-1992年の2時期に集中して行われたことも見てとれる。

対象地区での波による地形変化の限界水深は波浪条件に依存するが、図-2の縦断面比較によれば少なくとも

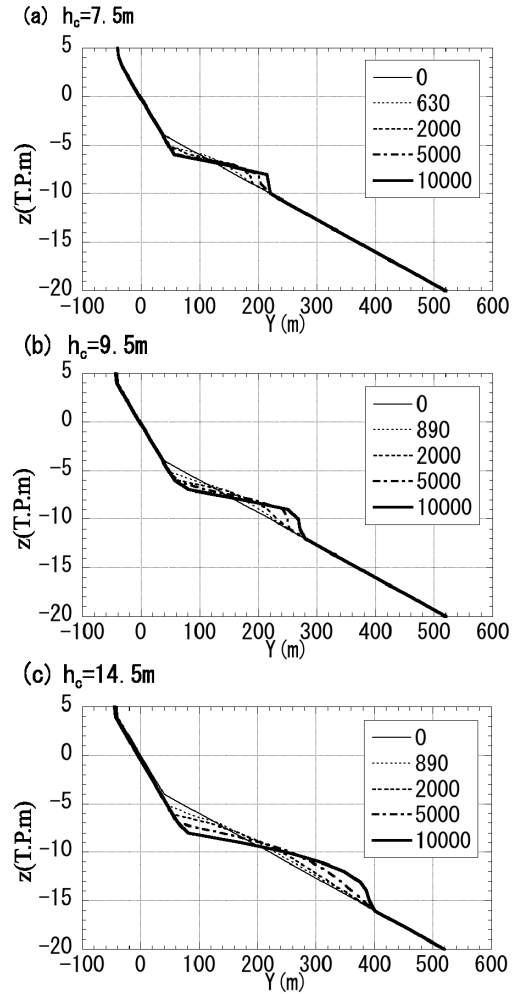


図-9 高波浪時の縦断面形変化

2000～2008年の間では h_c は14～15mにあった。また図-7によれば海底掘削は沖合600mより陸側で行われたことから、縦断面と比較すれば h_c が浅い区域に入る。したがって海底掘削によれば h_c が浅いでの堆積土砂量の減少をもたらすものであった。 h_c が浅い堆積土砂量が減少すると、縦断面は平衡勾配を保ちつつ地盤高は低下し、結果的に水深14mの地点が岸側に接近し、同時に水深4m付近の遷急点の水深も増加しなければならず、礫斜面ののり先水深も増大し、最終的に汀線が後退することになる。

6. 等深線変化モデルによる地形変化予測

宇多ら (2009) は2007年9月6日に襲来した台風9号による西湘海岸の急速な侵食に関して、福濱ら (2008) の考え方を応用した縦断面変化予測モデルを作成した。このモデルでは高波浪の作用時砂の持つ平衡勾配が小さくなり、これによって前浜の変動が起るとした。本研究

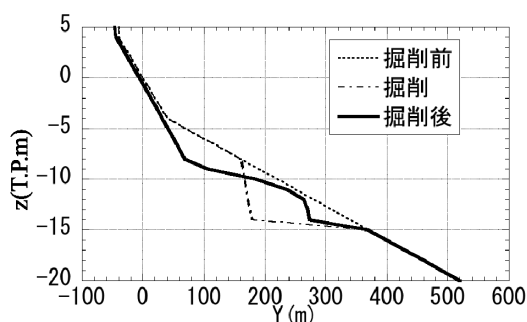


図-10 海底掘削が行われた場合の縦断形変化

では図-2の地形変化で粗砂・礫で構成される前浜急斜面の勾配がほとんど変化しないことを考慮し、粗砂・礫の前浜急斜面は高波浪を受けても平衡勾配が変動しないが、中砂細砂で形成される沖浜緩斜面は高波浪の作用により平衡勾配が緩くなると考えてモデル化を進めた。

(1) 計算条件の設定

計算には熊田ら(2003)の粒径を考慮した等深線変化モデルを用い、粒径は2成分を考えた。粒径1は水深4m以深に堆積している中砂細砂を代表する粒径で $d_1=0.2\text{mm}$ とし、常時の平衡勾配 $\tan\beta_{c1}=1/30$ が高波浪時には $1/100$ まで緩くなると仮定する。前浜～水深4mの粗砂・礫を代表する粒径は $d_2=2\text{mm}$ とし、その平衡勾配は常時も高波浪時も $\tan\beta_{c2}=1/10$ の一定値を保つと仮定する。波による地形変化の限界水深 h_c については、その最大値は図-2の地形変化実態をもとに 14.5m とし、限界水深が小さい場合については図-2を参照して前浜の急斜面の延長部分が侵食されたことを考慮して $h_c=7.5\text{m}$ を最小値とした。また、それらの間から $h_c=9.5\text{m}$ を選択し h_c の違いが縦断形変化に及ぼす影響を調べた。

(2) 再現計算

図-9は、 h_c を 7.5m 、 9.5m 、 14.5m と変えた場合の計算結果である。波が作用すると沖合の細砂で覆われた海底面で急速な沖向き漂砂が生じ、急斜面の基部が掘られ、沖合に土砂が堆積する。 h_c が大きくなるに従い変化土砂量も増大し、水深の大きな場所まで砂が落ち込む。この計算ではバーの形成予測はできないが、バーの載る緩勾配の海底面が沖向きに発達していく状況は、図-2の実測結果をよく説明している。

(3) 海底掘削の影響予測

初期地形に対し、単位長さあたり $550\text{m}^3/\text{m}$ の土砂を図-10の一点鎖線で示すように掘削したとする。その後限界水深 $h_c=14.5\text{m}$ となる波が作用すると、急速な沖向き漂砂

が発生し、掘削穴の埋め戻しが起こる。掘削が行われた場合は沖合の地盤高の低下が著しい。また前浜～汀線の急斜面ののり先水深が大きくなり、その分上部に載る土砂が落ち込むため結果的に汀線の後退が起こる。掘削ありの場合の汀線後退量は初期に対し 6m の後退となった。なお、長浜工区では、1962年から1983年までの間に海底掘削によって最大で 50m 以上の汀線後退が起こっており(宇多, 1997)、計算で得られた汀線後退量は最小の値と認識すべきである。

7. まとめ

本研究で得られた結果は以下のように要約される。

- ① 高知海岸(戸原・長浜工区)では、前浜斜面は、2003年まではほぼ水深 4m 以浅、2006年以降は水深 6m 以浅まで粗砂以上の粒径を有する砂礫がほぼ $1/10$ 勾配をなして堆積していた。またこれより深い海底では水深 15m までは中砂を主体とする底質が堆積し、緩斜面を形成していた。
- ② 沖合の緩斜面を形成する中砂を主とする底質は、2003年2月～2006年1月に沖向きに移動した。この期間、 $H_{1/3}=5\text{m}$ 以上の高波浪が長時間作用したことがその原因と推定された。なお、その期間、粗砂以上の砂礫を主とする前浜での地形変化は小さかった。
- ③ この断面変化の後、消波工等の構造物の沈下・散乱を伴う被災が発生した。また $H_{1/3}=6\text{m}$ 以下の波浪に対しては碎波点が岸に接近するとともに、うちあげ高の増大を招いている。
- ④ 中砂成分からなる沖浜斜面の断面変化は、粒径を考慮した等深線変化モデルにおいて、沖浜緩斜面の平衡勾配が、静穏時 $1/30$ から高波浪時の $1/100$ に変化すると仮定を設けることで説明可能である。また同じモデルによれば、海底掘削は汀線後退を招くことも明らかになった。

参考文献

- 宇多高明(1997):日本の海岸侵食,山海堂, pp. 347-361
 宇多高明・丸山将吾・高野弘之・芹沢真澄・三波俊郎・石川仁憲・宮原志帆(2009):T0709号時の高波浪による西湘海岸の急変形の再現計算,海岸工学論文集,第56巻, pp. 561-565.
 福濱方哉・宇多高明・山田浩次・芹沢真澄・石川仁憲(2008):前浜勾配と汀線の短期変動の予測モデル,海洋開発論文集,第24巻, pp. 1237-1242.
 熊田貴之・小林昭男・宇多高明・芹沢真澄(2003):沿岸・岸沖漂砂による粒径分級を考慮した等深線変化モデル,海岸工学論文集,第50巻, pp. 481-485.