

# 海底谷への土砂落ち込みの定量予測モデル - 国府津海岸への適用

## Quantitative Prediction of Sand Discharge into Submarine Canyons - Application to Kozu Coast

古池 鋼<sup>1</sup>・宇多高明<sup>2</sup>・細川順一<sup>3</sup>・塩入 同<sup>4</sup>・石川仁憲<sup>5</sup>・芹沢真澄<sup>6</sup>・三波俊郎<sup>1</sup>

Kou FURUIKE, Takaaki UDA, Jun-ichi HOSOKAWA, Tomo SHIO-IRI  
Toshinori ISHIKAWA, Masumi SERIZAWA and Toshiro SAN-NAMI

On the Seisho coast, submarine canyons have developed very close to the coastline and the discharge of fluvial sand of the Sakawa River into the submarine canyons has been reported, resulting in the net loss of sand into the offshore zone. The beach topography under the dynamically equilibrium conditions owing to the sediment supply from the river and the sand loss into the submarine canyons during several thousand years was reproduced using the contour-line-change model considering the grain size composition. Long-term beach changes around the submarine canyons were accurately predicted and the effect of beach nourishment using a mixture of fine and coarse materials was investigated.

### 1. まえがき

西湘海岸西部、森戸川河口の東側に位置する国府津海岸は、森戸川河口沖海底谷の谷頭付近に位置するため、高波浪時には波浪があまり減衰せずに海岸に到達する。国府津海岸では1947年当時幅70m以上の海浜があったが、その後汀線の後退に伴って浜幅が狭まった結果、越波被害が起こるようになった。侵食原因については酒匂川の流出土砂量の減少や、森戸川河口沖海底谷への土砂の落ち込みなど、様々な要因が指摘されているが、原因は必ずしも明確ではなく、このため有効な対策がとりにくい状況にあった。本研究は、このような問題を抱える国府津海岸についての対応策を練るために、まず酒匂川河口から森戸川河口沖海底谷を含む区域の海浜変形の再現を行い、様々な粒径の土砂を用いた養浜を行った場合の効果と影響について粒径を考慮した等深線変化モデル(熊田ら, 2007)を用いて予測する。

当地域では、地形的に見ると急流河川である酒匂川から大量の土砂が海へ供給され、それが海岸扇状地を形成させながら発達してきた。その場合、河川供給土砂が波による淘汰作用を受けつつ東向きに沿岸漂砂によって運ばれ、その過程において大部分の土砂が海底谷へと落ち込み、砂の一部が海底谷の谷頭を通過して東向きに運ばれると考えられる。このため予測モデルでは、①河口沖

での土砂移動や森戸川河口沖の海底谷を経由した深海への土砂損失を説明でき、②酒匂川からの土砂流出は現海水面になってから数千年間は続いているので、長期的に見てほぼ一定量の土砂供給の条件下でその土砂が東向きに流れ、海岸がほぼ動的平衡状態にあったことが説明できることが要求される。さらに、③土砂採取などに起因する供給土砂量の減少、および各種海岸構造物の建設の影響を定量的に評価でき、④その上で礫、砂など粒度成分ごとの移動、堆積をも定量的に予測可能なことが求められる。

### 2. 海底地形特性と酒匂川からの供給土砂

#### (1) 海底地形特性

1990年の海底地形図をもとに、1983年の縦断測量データと1985年の空中写真を用いて修正を加えた西湘海岸の海底形状を図-1に示す。西湘海岸は海底勾配が急で、汀線近傍まで海底谷が発達している。とくに森戸川河口沖の海底谷の規模が大きい。また酒匂川河口デルタが大きく突出しており、酒匂川からの供給土砂が東側海岸へ供給されている。図-2は、2008年実施の縦断測量と底質採取データをもとに、河口右岸のNo.3と森戸川河口沖海底谷を通るNo.33における縦断形変化、 $d_{50}$ の水深方向分布および粒度組成の水深分布を示す。これによると、No.3の-4m以浅では $d_{50}$ が10mm以上であり、汀線付近は礫で覆われているが、-5m以深ではほぼ0.3mm以下と細くなる。これに対し海底谷を通るNo.33では前浜では粒径が小さく水面下で礫が現れるが、-10mまでと他の測線と比較して水深の大きな場所まで礫が堆積している。粒度組成から見ても同様な特徴が読み取れ、海底谷から離れた測線No.3の汀線付近では礫が集中的に堆積する一方、沖合の海底は細砂(0.075~0.25mm)、中砂(0.25~

1		海岸研究室(有)
2	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
3		神奈川県土木整備局河川下水道部流域海岸企画課技幹
4		神奈川県藤沢土木事務所なぎさ河川砂防部
5	正会員	工修 (財)土木研究センターなぎさ総合研究室
6	正会員	海岸研究室(有)

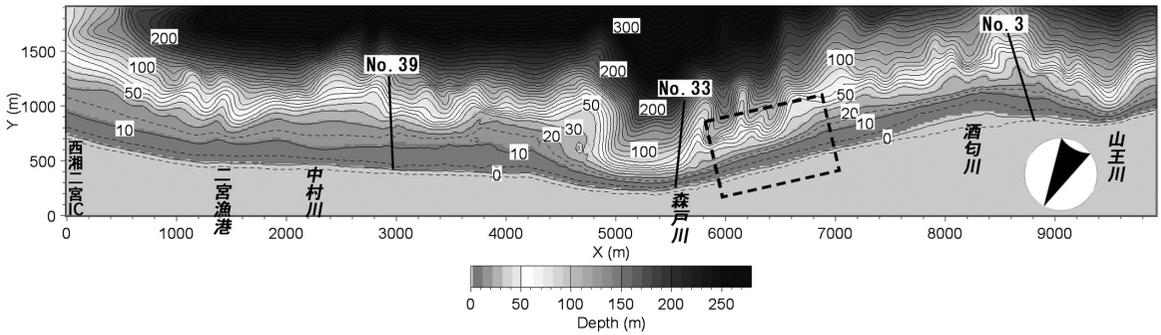


図-1 西湘海岸の海底形状 (1990年)

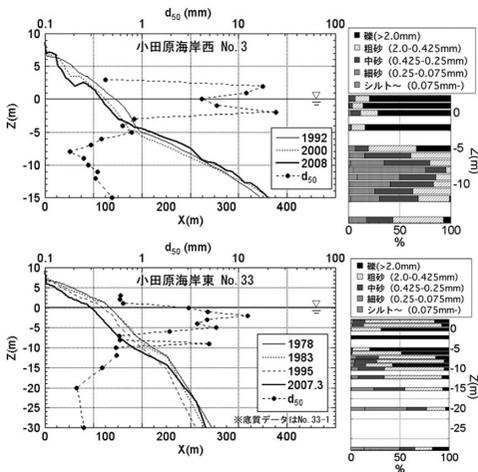


図-2 測線No.3とNo.33における縦断形変化,  $d_{50}$ の水深方向分布および粒度組成の水深分布

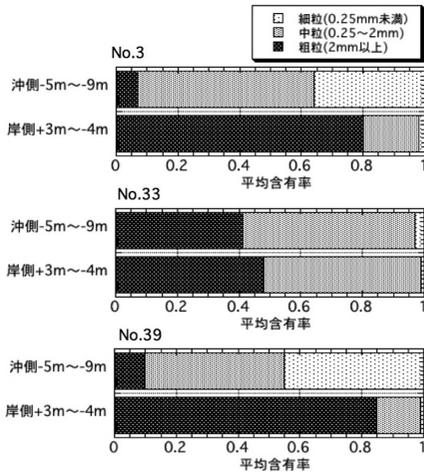


図-3 -5m以浅以深で区別した細粒, 中粒, 粗粒成分の平均含有率

0.425mm), 粗砂 (0.425~2.0mm) で覆われている。

測線No.3の縦断形によると, 水深ほぼ5m付近に勾配変化点 (遷急点) があることから, -5m付近で水深を区分し, +3~-4mと-5~-9mでの測定データを用いて, 細粒 (細砂: 0.25mm未満), 中粒 (中砂+粗砂: 0.25~2mm), 粗粒 (礫: 2mm以上) の平均含有率を求めた。結果を図-3に示す。No.3に加えて中村川の西0.5kmに位置するNo.39を含めると, +3~4mの水深帯では, 粗粒の含有率が0.80以上であるのに対し, 沖合では細粒, 中粒の含有率が0.90以上を占めている。しかし海底谷背後のNo.33では, いずれの水深帯にあって中粒と粗粒がほぼ1/2ずつ含まれており, 水深帯によらずほぼ一定割合を有していることから, 相対的に水深の大きな場所まで中粒・粗粒土砂が堆積していることが分かる。

(2) 酒匂川からの供給土砂量

宇多・矢野 (1987) は, 地形図と空中写真をもとに1930~1981年における酒匂川河口部の汀線変化を求め, 戦後河川での砂利採取や上流部における三保ダムの建設などにより酒匂川河口デルタが縮小してきたことを明ら

かにした。この研究で示された汀線変化をもとに, 河口デルタ西端を区切る山王川河口 (X=9.7km) までの区域で上記期間の侵食土砂面積を求めると侵食面積は80万 $m^2$ となり, 経過年数で割ると東向きに沿岸漂砂量が18万 $m^3/yr$ と推定される。このことから, 自然状態にあった当時の酒匂川からの供給土砂量は海浜形成に寄与する成分でほぼ20万 $m^3/yr$ と考えられる。

3. 再現計算のための条件設定

計算には混合粒径砂の分級過程を考慮した海浜変形モデル (熊田ら, 2007) を用いた。また海岸構造物の設置に伴う回折効果は不規則波の方向分散法 (酒井ら, 2003) により求めた。表-1には計算条件を示す。計算範囲は, 酒匂川河口から二宮漁港までの沿岸方向に約8kmの海岸である。計算は再現計算と予測計算とからなる。再現計算では, 酒匂川から自然状態での土砂供給があった当時の1947年と2007年を再現した。一方, 予測計算では現況のまま放置する案や, 粗粒材, 細粒材および混合材養浜を行った場合の効果検討を行った。

表-1 計算条件

計算モデル	粒径を考慮した等深線変化モデル (熊田ら, 2007) 回折計算: 方向分散法 (酒井ら, 2003)
計算対象区域	西湘海岸 (酒匂川~二宮漁港): 沿岸方向 8km×岸沖方向2km
初期地形	海図 (1990年). 汀線近傍は1973年の横 断測量および空中写真により補正.
計算ケース	再現計算: 1947年 (自然状態) と2007年 ケース1 放置 ケース2 粗粒材養浜 (2万m <sup>3</sup> /yr) ケース3 細粒材養浜 (2万m <sup>3</sup> /yr) ケース4 混合材養浜 (2万m <sup>3</sup> /yr)
入射波条件	エネルギー平均波: 波高H=0.83m, 周期 T=6.08s, 波向S17° E
潮位条件	M.S.L.±0.0m
計算空間メッシュ	ΔX=100m
計算時間間隔Δt	Δt=100hr
計算ステップ数	87.6step/yr 1947年再現 (20万steps, 2280年)
平衡勾配と含有率	細粒 (0.25mm以下), tanβ=1/20, μ <sub>1</sub> =0.75 中粒 (0.25~2mm), tanβ=1/10, μ <sub>2</sub> =0.20 粗粒 (2mm以上), tanβ=1/7, μ <sub>3</sub> =0.05 交換層厚: ΔZ=1m
漂砂の水深方向分布	宇多・河野の分布
波による地形変化 の限界水深	h <sub>c</sub> =9m
バーム高	h <sub>R</sub> =3m
漂砂量係数	漂砂量係数K <sub>s</sub> =A <sub>s</sub> /√d <sub>50</sub> , A=0.055 細粒K <sub>s</sub> =0.123, 中粒K <sub>s</sub> =0.055, 粗粒K <sub>s</sub> =0.025 沿岸岸沖漂砂量係数比 K <sub>s</sub> /K <sub>s</sub> =0.2 小笹・Brampton係数: K <sub>2</sub> =1.62K <sub>1</sub> (tanβ=1/30) 土砂落ち込みの限界勾配 陸上: 1/2, 水中 : 1/7
境界条件	酒匂川の流出土砂: 自然状態 20万m <sup>3</sup> /yr, 現況 10万m <sup>3</sup> /yr (X=8,400m, 全等深線で湧 き出し), 粒度組成 μ <sub>1</sub> =0.75, μ <sub>2</sub> =0.20, μ <sub>3</sub> =0.05 岸端: q=0, 沖端: 漂砂の流入流出自由 森戸海底谷への損失: 自然状態 10万 m <sup>3</sup> /yr
露岩条件	露岩域 K <sub>r</sub> =0.7 (X=2 km~4.6 km)

入射波条件として、検討区域の東端から東10kmに位置する平塚での1988~2008年の観測値をもとにして定めたエネルギー平均波(波高0.83m, 周期6.1s)を用い、波向は二宮漁港東側の汀線直角方向のS17° Eとした。計算の空間メッシュは100m, 計算時間間隔は100hrとした。計算ステップは87.6ステップ/yrとし、再現計算ではまず動的平衡状態にあったと考えられる1947年における自然状態の地形を造るため十分長い時間 (20万ステップ: 2280年) の計算を行い、その地形を初期地形として2007年の地形を計算した。その上で10年後の予測を行った。平衡勾配は、粒径3成分に対応させ実測値をもとにtan β =1/20 (細粒), 1/10 (中粒), 1/7 (粗粒) とした。

再現計算では、まず酒匂川の流出土砂量を10万m<sup>3</sup>/yrと推定し、飯泉取水堰の下流側堆積域で測定された堆積

表-2 粗粒中粒細粒材の含有率

d(mm)		含有率	
粗礫 (19<d<75mm)	0.07	粗粒 μ <sub>1</sub> =0.37	細粒 μ <sub>3</sub> =0.1
中礫 (4.75<d<19mm)	0.20		
細礫 (2<d<4.75mm)	0.10	中粒 μ <sub>2</sub> =0.56	中粒 μ <sub>2</sub> =0.4
粗砂 (0.85<d<2mm)	0.15		
中砂 (0.25<d<0.85mm)	0.41	細粒 μ <sub>3</sub> =0.06	細粒 μ <sub>1</sub> =0.5
細砂 (0.075<d<0.25mm)	0.06		

表-3 粒径ごとの含有率

粒度		平衡勾配	含有率
粗粒	2mm以上	1/7	μ <sub>3</sub> = 0.05
中粒	0.25~2mm	1/10	μ <sub>2</sub> =0.20
細粒	0.25mm以下	1/20	μ <sub>1</sub> =0.75

土砂の粒度組成を基礎として、粒径ごとの供給土砂量をμ<sub>1</sub>=0.06, μ<sub>2</sub>=0.56, μ<sub>3</sub>=0.38 (表-2) を乗じて定め、これらの土砂を河口から流入させた。しかしこの条件での地形変化予測では、平衡勾配の大きい中粒・粗粒の含有率(μ<sub>2</sub>, μ<sub>3</sub>)が高いため、沖の緩斜面の再現ができなかった。そこで飯泉取水堰下流の堆積土砂について、中砂は細粒分に、細礫と中礫が中粒分に含まれると考え、μ<sub>1</sub>=0.5, μ<sub>2</sub>=0.4, μ<sub>3</sub>=0.1 (表-2) とおいて地形変化予測を行ったところ沖の緩斜面の再現が可能となった。しかし突堤下手側では粗粒化が進み過ぎて汀線後退量が過小となった。またこの計算では、酒匂川から森戸川に至る区間の汀線付近の勾配が急なため、森戸海底谷に至るまでに平衡勾配の小さな細粒分はほぼ全量が沖へ流出する結果となった。このように粗粒と粗粒土砂の量にかかわらず細粒分は沖へ流出することから、縦断形の再現ができている岸側に寄与する中粒・粗粒分量は同一としたまま、細粒分を大幅に増やし、供給土砂総量を上限値の20万m<sup>3</sup>/yrとして計算を行った。すなわち自然状態での土砂供給量を10万m<sup>3</sup>/yrから20万m<sup>3</sup>/yrまで増加させ、μ<sub>1</sub>=0.75, μ<sub>2</sub>=0.20, μ<sub>3</sub>=0.05とすると、細粒・中粒・粗粒の供給土砂量は15万m<sup>3</sup>/yr, 4.0万m<sup>3</sup>/yrおよび1.0万m<sup>3</sup>/yrとなる。この条件により酒匂川が自然状態にあった当時の海底地形の再現がほぼ可能となった。なお、ダムや砂利採取の影響により総流出土砂量が半減したと仮定した。その時期は正確には定められないので1947年以降とした。以上の結果定められた粒径ごとの含有率を表-3に示す。また近年の様々な改変が行われた後の海浜変形予測にあっては、二宮漁港でのサンドバイパス、国府津海岸での養浜、酒匂川河口右岸での養浜を考慮するとともに、森戸川河口沖の海底谷から二宮漁港の間の露岩域の波高伝達率K<sub>r</sub>を表-1のように定めた。

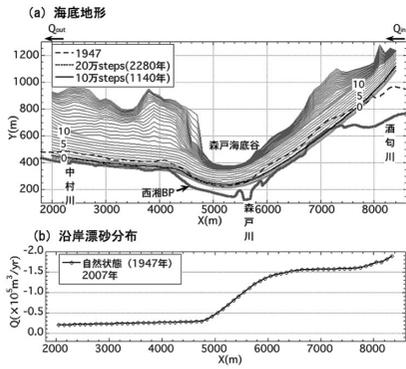


図-4 20万ステップ(2280年)の波作用により動的平衡状態に達したときの予測地形

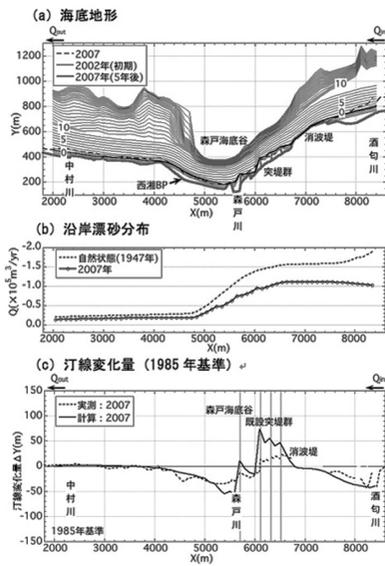


図-5 2007年までの予測結果

4. 再現計算の結果

酒匂川からの供給土砂量が自然状態にあった当時の動的平衡海浜形状の予測を行った。河口から  $20 \text{ m}^3/\text{yr}$  の土砂が表-3に示す  $\mu_1=0.75, \mu_2=0.20, \mu_3=0.05$  の割合で流入し、東端からは  $2 \text{ m}^3/\text{yr}$  の沿岸漂砂が流出する条件を設定し、20万ステップ(2280年)と十分長い時間波を作用させて動的平衡状態に達したときの予測地形を図-4に示す。図には比較のために人為改変が少なかったと考えられる1947年の汀線を破線で示す。酒匂川からの流出土砂量が多かったために、河口沖の急斜面にそのまま続くように河口デルタが大きく発達していたという結果が得られた。また酒匂川河口から森戸川河口沖海底谷を経て大きく湾曲した1947年当時の汀線形状と予測汀線はほぼ一致を見ている。また森戸川河口沖海底谷では-10m付近

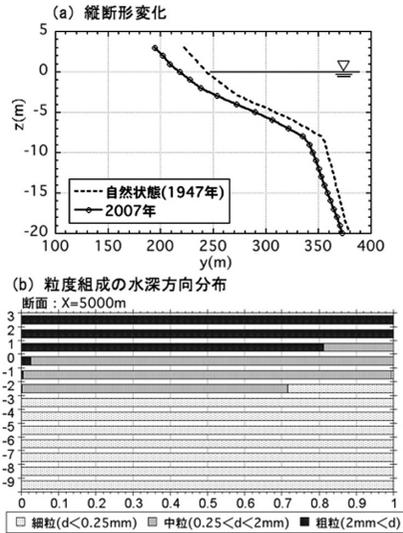


図-6 海底谷を通る  $X=5\text{km}$  断面における1947, 2007年の縦断形変化と粒度組成の水深方向分布

までの等深線が沿岸方向に滑らかに伸び、その沖に急勾配斜面が発達するという実測海底形状の特徴をうまく再現することができた。動的平衡状態に達していた1947年当時の沿岸漂砂量の分布を図-4(b)に示すが、沖合への土砂損失があるため沿岸漂砂量は酒匂川河口から東向きに漸減傾向となる。

2007年までの予測結果を図-5に示す。沿岸漂砂量が減少した状態のもとで、突堤群の影響と主に森戸川突堤下手側での養浜の効果が重なった結果が得られた。汀線変化で見ると検討区域全域において実測と予測値とがよく一致し、汀線変化の傾向はよくあっている。また図-6(a)(b)には海底谷を通る  $X=5\text{km}$  断面における1947年と2007年の縦断形変化と粒度組成の水深方向分布を示す。1947年と比較すると供給土砂量が大きく減少したために断面全体が後退している。またその場合の粒度組成は汀線付近に粗粒(礫)が集中し、その沖には中粒分が堆積するという結果となるが、このような結果は、図-2に見られた実測値の傾向と一致する。

5. 予測計算

現況再現計算をもとに10年後の海浜形状を予測した(図-7~9)。放置(ケース1)の場合、森戸川河口右岸にある既設突堤群の東側では現況と比較して最大20m汀線が後退する。また汀線後退域は  $X=4\text{km}$  まで及ぶ。粗粒材(粒径2mm以上)を毎年  $2 \text{ m}^3$  の割合で投入するケース2では、粗粒材は平衡勾配が大きいため汀線付近に堆積し、海底谷の谷頭付近で汀線が三角形に前進する。10年間

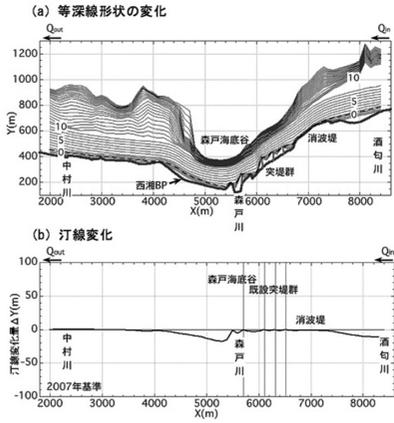


図-7 10年後の予測海浜形状 (ケース1: 放置)

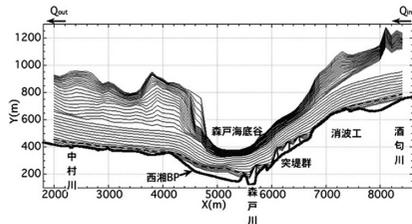


図-8 10年後の予測海浜形状 (ケース2: 粗粒材養浜)

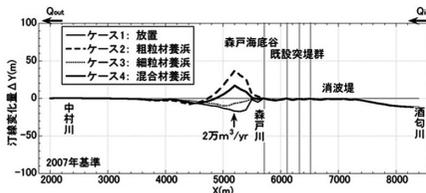


図-9 10年後の予測海浜形状 (ケース2~4)

の継続養浜によれば汀線は現況と比較して最大40mの前進を期待することができる。一方粒径が0.25mm未満の細粒材を毎年2万m³投入するケース3では、土砂投入を行っても現状維持程度であり、浜幅の回復は見込むことができない。粒径が0.25mm未満の細粒分と粗粒材(礫)をそれぞれ1万m³投入するケース4では、粗粒材のみ2万m³投入したケース2の1/2の汀線前進量(20m)を見込むことができる。

図-10, 11には各ケースの縦断形変化を示す。粗粒材を2万m³/yrの割合で投入するケース2では、汀線付近にあった急勾配部分が水深の大きな場所まで広がり、同時に細粒分の不足に伴い沖合の地盤高の低下が起こった。一方細粒材を同じ割合で投入するケース3では、細粒材が沖合に堆積するため沖合では断面が前進したが、汀線の前進は起こらなかった。これらに対し混合材養浜では沖合の地盤高の低下を防ぎつつ前浜を広げることが可能であった。

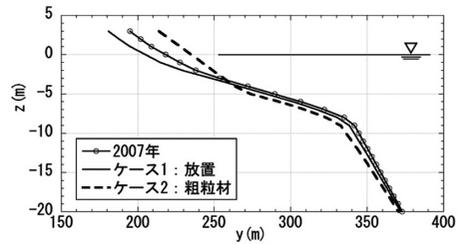


図-10 10年後の断面変化 (ケース1, 2)

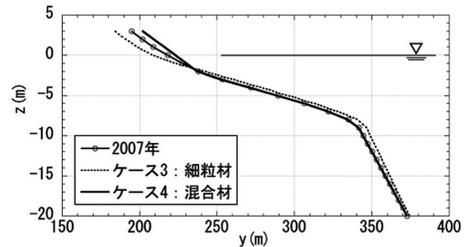


図-11 10年後の汀線変化 (ケース3, 4)

## 6. 結論

酒匂川河口から森戸川河口沖の海底谷を経て、二宮漁港まで8kmの海岸を対象として酒匂川からの供給土砂の量と質(粒度組成)を与えて海浜変形予測を行った結果、自然状態にあった当時からの、現況のように供給土砂量が大きく減少した時代までの海浜変形をほぼ再現することができた。また各種対策案を採用した条件での10年後の予測によると、現状のままでは国府津海岸ではさらに最大20m浜幅が狭まって災害危険度が増す。粒径を考慮した養浜では、海底谷付近の縦断形は動的平衡状態にあることから、粗粒材を2万m³/yrの割合で投入すれば汀線は前進させることができる反面、沖合の海底地盤が低下すること、細粒材を同量投入するのであれば沖合の地盤高の低下は防げるものの汀線前進には役立たないことが判明した。そこで両者の複合案として粗粒材と細粒材を全量の1/2ずつ投入すると、全体的に断面を前出しすることが可能となった。

## 参考文献

宇多高明・矢野 滋 (1987) : 相模湾西湘海岸の侵食実態について, 地形, Vol.8, pp. 1-19.  
 宇多高明・川崎俊太・見附敬三 (1995) : 西湘海岸小八幡地区に建設された突堤の漂砂阻止率の検討, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 671-675.  
 熊田貴之・宇多高明・芹沢真澄 (2007) : 卓越粒径集団に応じた平衡勾配を考慮した等深線・粒径変化モデル, 土木学会論文集B, Vol. 63, No.2, pp. 154-167.  
 酒井和也・小林昭男・宇多高明・芹沢真澄・熊田貴之 (2003) : 波の遮蔽構造物を有する海岸における3次元静的安定海浜形状の簡易予測モデル, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 496-500.