

湘南海岸における土砂の質(粒径)と量を考慮した土砂管理計画の検討

Regional Sediment Management Considering Volume of Sand and Grain Size

石川仁憲¹・宇多高明²・古池 鋼³・鮫島 強⁴・吉岡 敦⁵

Toshinori ISHIKAWA, Takaaki UDA, Kou FURUIKE, Tsuyoshi SAMEJIMA and Atsushi YOSHIOKA

The Shonan coast facing Sagami Bay has been eroding since the 1970s. Now that the steady procurement of nourishment sand has become difficult in Japan because of the limited sand resource, the effective use of sand presently deposited on a coast has become important. For this purpose, regional sediment management considering not only sand volume but also the sand grain size is important. In this study such sediment management for maintaining beaches was considered, taking the Shonan coast as an example, and applying the contour-line-change model considering the changes in grain size.

1. はじめに

相模湾に面し、相模川河口から江の島間に延びる長さ10kmの湘南海岸では、相模川上流部でのダム建設、相模川河道での大規模な砂利採取、河口での航路浚渫により河川流出土砂量が激減し、さらには海岸では茅ヶ崎漁港による沿岸漂砂の阻止などにより侵食が進んできた。この結果、相模川河口部では汀線が最大約300m後退し、また茅ヶ崎中海岸においても約50mの後退が起きた(宇多ら, 2006)。湘南海岸では、侵食対策としてこれまでに施設の整備や養浜が行われ一定の効果を上げている(石川ら, 2008)が、河川からの土砂供給が期待できない状況の中で、将来にわたって計画的、かつ確実に海岸保全を進めるには、適切な養浜材料と必要な養浜量を確保して継続的に養浜を行うことが求められる。また、安定的に養浜材を確保する意味からも限りある資源である海岸砂を有効活用することも大事である。この場合、海岸保全上必要とされる砂の粒径は、その海岸の侵食・堆積状況に依存して場所ごとに異なることから、従来のように土砂量のみの管理ではなく、土砂の質(粒径)についても十分考慮した土砂管理が求められる。このことから本研究では、粒径を考慮した等深線変化モデルを応用し、湘南海岸における中長期的な海岸の土砂管理について検討した。

2. 地形・粒径変化予測モデル

宇多ら(2008)は、相模川河口～江の島間10kmを対

1	正会員	工修	(財)土木研究センターなぎさ総合研究室
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海岸研究室(有)
3			神奈川県松田土木事務所河川砂防第二課長
4			神奈川県県土整備局河川下水道部砂防海岸課
5			

象に、飛砂と粒径変化を考慮しつつ海浜変形の時空間的变化を予測可能な数値モデルを構築した。このモデルでは、河川からの供給土砂量と等しい量の土砂を海岸線全体から抜き取ることにより、汀線が一定速度を保ちつつ前進する動的平衡状態にある河口デルタの、海浜縦断形の沿岸方向変化や粒径の沿岸分級の再現を可能とした。このようにこのモデルは実用レベルでの使用が可能となったものの、飛砂の取り扱いについての課題が残されていた。具体的には、実際の飛砂はほぼ100%細粒分であるにもかかわらず、計算では前浜の+1～+3mの範囲に堆積している粒径の含有率に依存させてその地点の飛砂量に相当する量の吸い込みを行った。これは前浜に存在しない粒径成分の流出を許すと、数値計算上マイナスの含有率が生じることを回避するためであった。しかしこの方法では汀線付近の粗い粒径成分が流出してしまい海浜では細粒化が進むことになる。

本研究では、宇多ら(2008)のモデルを改良することによりこの課題を解決した。まず細粒分のみを吸い込む方法を考えた。しかしこの方法では前浜にその細粒分がない場合、必要な飛砂を流出させることができず、土砂収支が実際と合わなくなるという問題が生じた。様々な検討の結果、汀線より陸側区域のみで飛砂を考慮するのではなく、細粒分が多く含まれる水深3mまでの等深線に対して飛砂を考慮するものとした。すなわち、汀線のすぐ沖からも細粒分が補充されると考え、水面下の等深線から飛砂量に相当する細粒分を吸い込む方法をとった。実際には、潮位変動もある中で通常波浪の作用によって沖の細粒分が岸にうち上がり、これが飛砂として流出することに相当すると考えられる。この工夫により、土砂収支や粒径分布の予測精度の向上が可能となった。

(1) 計算条件の設定

まず1945年当時の人工構造物のない条件下において、相模川(右端境界)から11万m³/yrの割合で土砂が流入

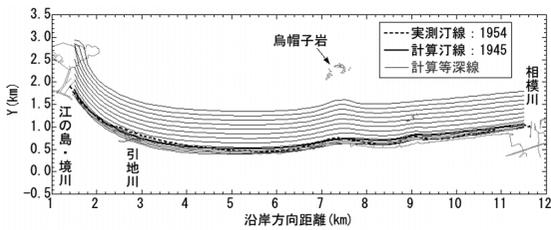


図-1 再現等深線 (1945年)

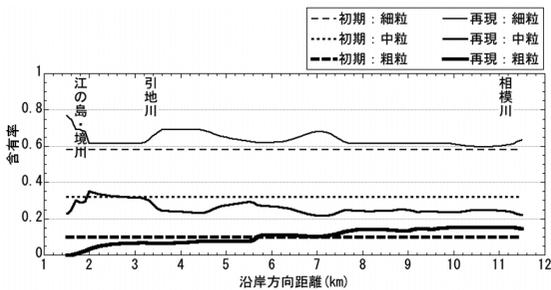


図-2 各粒径成分の含有率の沿岸方向分布 (1945年)

し、これが沿岸漂砂となって東向きに運ばれ相模川河口から江の島間に堆積するという動的平衡状態を再現した。その上で、漂砂環境の変化と構造物の設置状況を考慮し、2007年までの地形変化を計算した。飛砂量の沿岸方向分布は、宇多ら (2008) と同様とし、計算では-1m ~ -3m 区域から陸へと運ばれる飛砂を吸い込み、自然状態では背後地に飛散して欠損するが、1973年以降は管理道路や護岸などの壁体前面の標高4~5mの区域に堆積するものとした。このほかの計算条件は基本的に宇多ら (2008) と同様である。入射波条件は、湘南海岸におけるエネルギー平均波 (波高0.83m, 周期6.4s), 波向は再現計算より同定した波向S13°Eを用いた。粒径は、湘南海岸の底質が主に細砂・中砂で構成されていることから、3成分 (細粒: $d < 0.25\text{mm}$, 中粒: $0.25 < d < 0.425\text{mm}$, 粗粒: $0.425\text{mm} < d$) とし、初期含有率は8測線の底質調査結果の平均値 ($\mu_1 : \mu_2 : \mu_3 = 0.58 : 0.32 : 0.10$), 各粒径に対応する平衡勾配は底質の水深方向分布と縦断形の関係より、それぞれ1/100, 1/40, 1/10とした。計算条件を表-1に示す。

(2) 再現計算

宇多ら (2008) と同様、再現計算は、漂砂環境の変化、構造物の設置状況より5段階で行った。自然状態の1945年の地形、相模川からの流出土砂激減による1945~1954年の地形変化、茅ヶ崎漁港建設による1954~1973年の地形変化、茅ヶ崎漁港の拡張と浚渫による1973~1996年の地形変化、ヘッドランド・柳島消波堤が建設され、養浜が行われている近年の1996~2007年の地形変化である。

表-1 計算条件

計算対象区域	相模川河口~江の島: 延長10km
再現計算	1945年地形 (自然状態) の再現後, 相模川からの流出土砂量激減 (=0), 茅ヶ崎漁港, ヘッドランド建設, 柳島消波堤建設, 養浜実施などを段階的に考慮して, 1945~2007年の地形変化を再現.
将来予測計算	1 1996年以降の養浜を継続 2 養浜を中止 3 計画汀線達成のための土砂管理手法 4 計画汀線維持のための土砂管理手法 ※各ケース10年後まで計算
初期地形	再現: 直線平行等深線, 将来: 再現結果
入射波条件	$H = 0.83\text{m}$, $T = 6.35\text{s}$ (エネルギー平均波) 波向: 再現計算により同定. 波向S13°E
潮位条件	M.S.L. = T.P. ± 0.0m
計算等深線	$z = +5\text{m} \sim -12\text{m}$, $h_c = 9\text{m}$ バーム高 $h_R = 3\text{m}$
空間メッシュ	沿岸方向 $\Delta X = 500\text{m}$, 鉛直方向 $\Delta Z = 1\text{m}$
計算時間間隔	$\Delta t = 400\text{hr}$
粒径	粒径3成分 粒径1 細粒 $d < 0.25\text{mm}$ 粒径2 中粒 $0.25 < d < 0.425\text{mm}$ 粒径3 粗粒 $0.425\text{mm} < d$ 代表粒径, 平衡勾配, 交換層厚 粒径1 $d_1 = 0.15\text{mm}$, $\tan\beta = 1/100$, 0.5m 粒径2 $d_2 = 0.20\text{mm}$, $\tan\beta = 1/40$, 1.25m 粒径3 $d_3 = 1.00\text{mm}$, $\tan\beta = 1/10$, 5m 交換層: ΔZ あたり 50m 含有率: 実測平均値 $\mu_1 = 0.58$, $\mu_2 = 0.32$, $\mu_3 = 0.10$
漂砂量	沿岸漂砂量係数 $K_x = A/\sqrt{qd_{50}}$ $A = 0.070$ 粒径1 $K_x = 0.18$, 粒径2 $K_x = 0.16$, 粒径3 $K_x = 0.07$ 小笹・Brampton係数 $K_2 = 1.62K_x$ ($\tan\beta = 1/30$) 岸沖漂砂量係数 $K_c = 0.15 K_x$
土砂落ち込みの限界勾配	陸上 1/2, 水中 1/3
境界条件	右端 $q_x = 11 \times 10^4 \text{m}^3/\text{yr}$ (再現計算 1945年) 粒径1: $7.3 \times 10^4 \text{m}^3/\text{yr}$ 粒径2: $2.8 \times 10^4 \text{m}^3/\text{yr}$ 粒径3: $0.9 \times 10^4 \text{m}^3/\text{yr}$ $q_x = 0$ (再現計算 1945年以降, 将来) 左端 $q_x = 0$ 岸沖端 $q_2 = 0$ (漂砂の流入流出なし) 飛砂 -1~-3mの等深線から沿岸方向分布に合わせて計-2.3万 m^3/yr (地点毎の粒度組成). 1973年以降の計算は, 護岸前面の飛砂堆砂を考慮し+4~-5mの等深線へ+2.3万 m^3/yr .
養浜条件	等深線 ± 0.0m ~ +3.0m に注入 (1) 再現計算 (1996~2007), ケース1: 養浜実績 計2.3万 m^3/yr 片瀬西浜, 菱沼, 中海岸, 柳島の4箇所 粒度組成 $\mu_1 : \mu_2 : \mu_3 = 0.58 : 0.32 : 0.10$ (2) ケース3 中海岸 3.0万 m^3/yr ($X = 8.3\sim 8.5\text{km}$) 柳島 0.5万 m^3/yr ($X = 10\sim 10.2\text{km}$) 粒度組成 (中海岸養浜実績2006~2008年) $\mu_1 : \mu_2 : \mu_3 = 0.20 : 0.27 : 0.53$ (3) ケース4 中海岸 1.0万 m^3/yr ($X = 8.3\sim 8.5\text{km}$) 柳島 0.25万 m^3/yr ($X = 10\sim 10.2\text{km}$) $\mu_1 : \mu_2 : \mu_3 = 0.20 : 0.27 : 0.53$
構造物条件等	三浦半島, 江の島, 烏帽子岩, 平島 ($K_1 = 0.6$), 茅ヶ崎漁港, ヘッドランド ($K_1 = 0.3$) を考慮 各施設の延長に対応して護岸境界設定

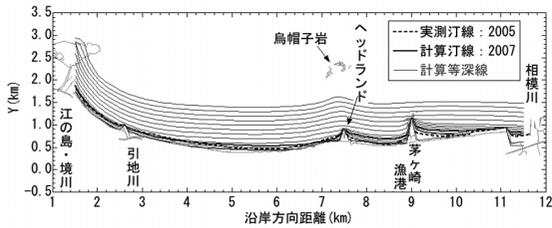
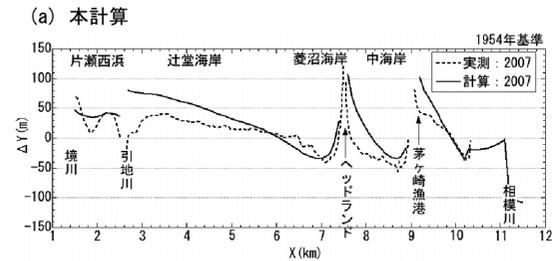
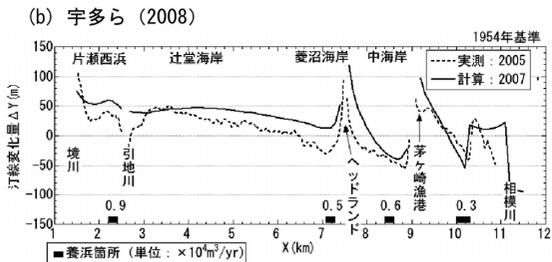


図-3 再現等深線と実測汀線 (2007年)



(a) 本計算



(b) 宇多ら (2008)

図-4 汀線変化量 (2007年)

自然状態にあった1945年地形の再現等深線を図-1, 各粒径成分の含有率の沿岸方向分布を図-2に示す. 平行等深線形状から出発し, 相模川からの流出土砂と飛砂を考慮した2000年間の予測計算結果である. 相模川からの流出土砂が東向き漂砂によって漂砂下手に運ばれつつ全体としてデルタ地形が発達するとともに, 江の島や烏帽子岩などによる回折効果を受けて緩やかに湾曲した等深線形状が再現できた. 各粒径成分の含有率については, 初期の沿岸方向一様な含有率が, 相模川河口付近では粗粒分の含有率が高まると同時に, 江の島側では細粒分が多く到達して含有率が高まるという沿岸分級が生じている. この結果を用いて2007年までの地形変化の再現計算を行った.

2007年地形の再現等深線と実測汀線を図-3, 汀線変化量を図-4, 各粒径成分の含有率の沿岸方向分布を図-5に示す. 1996年から2007年では沿岸各地で養浜が行われている. その内訳は, 片瀬・鶴沼海岸 (X=2.2~2.4km) で $0.9 \text{ 万 m}^3/\text{yr}$, 菱沼海岸 (X=7.1~7.3km) で $0.5 \text{ 万 m}^3/\text{yr}$, 中海岸 (X=8.4~8.6km) で $0.6 \text{ 万 m}^3/\text{yr}$, 柳島海岸 (X=10.0~10.3km) で $0.3 \text{ 万 m}^3/\text{yr}$ であり, 計算ではこれらを考慮した. 相模川河口部を除けば全体的な汀線変化

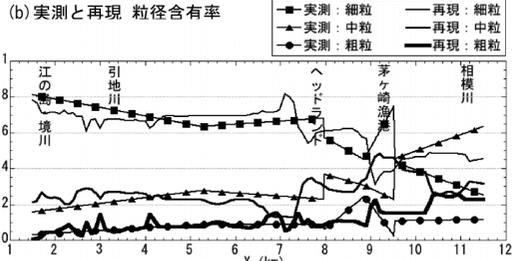
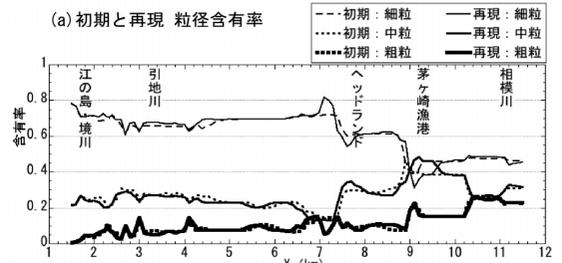


図-5 各粒径成分の含有率の沿岸方向分布 (2007年)

傾向は実測とよく対応しており, ヘッドランド下手の汀線後退など, 図-4(b)に示す宇多ら (2008) の結果より海岸保全を検討する上で重要な侵食域の再現性が向上している. また, 粒度組成の沿岸方向分布も実測値 (2005~2007年) をよく再現できている.

以上のことから, 宇多ら (2008) のモデルに対し飛砂の扱い方を修正した本モデルによれば, 相模川河口から江の島まで10kmの漂砂系全体の海岸線に対し, 相模川からの土砂流入や飛砂による海岸線からの細砂の損失も含めて自然状態にあった1945年から2007年までの長期的な海浜変形の再現が可能となった.

3. 土砂管理手法の検討

1996年から2007年まで行われてきた各地先での養浜の継続 (ケース1), 中止 (ケース2) に加え, 防護上必要な計画汀線 (計画波浪に対して波のうちあげ高を計画護岸高以下にするために必要な浜幅) を満足するために必要な土砂管理手法の検討 (ケース3) を行った. この場合, 河川からの土砂供給が期待できない状況の中で, 継続的かつ安定的な養浜材の調達, 限りある資源である海岸の砂の有効活用の観点から, 相模ダムの浚渫土砂を養浜材として投入するほかに, 飛砂によって後浜に堆積した細砂のサンドリサイクル, サンドバイパスを考えた. 計算では投入・採取位置, 投入・採取量を様々変えて海岸保全効果や影響を定量的に検討した. なお浚渫土砂の粒度組成は, 2006~2008年に茅ヶ崎中海岸に実際に投入された相模ダムの浚渫土砂の平均値 ($\mu_1 : \mu_2 : \mu_3 = 0.20 : 0.27 : 0.53$) を用いた. さらにケース3で検討した土砂

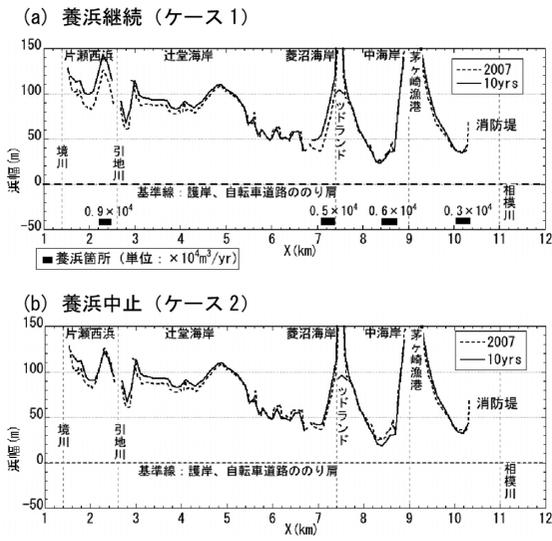


図-6 浜幅変化量

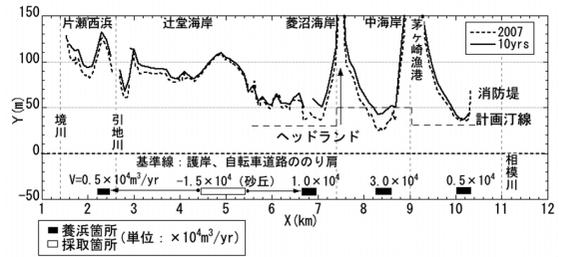


図-7 浜幅変化量 (ケース3)

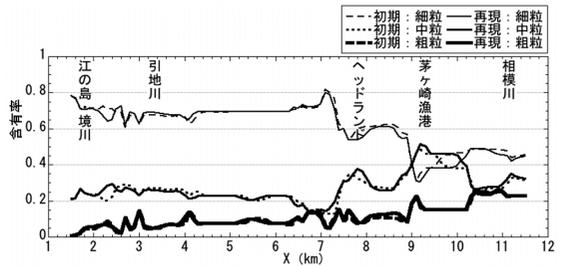


図-8 各粒径成分の含有率の沿岸方向分布 (ケース3)

管理手法により計画汀線を達成した後、その汀線を維持するために必要な土砂管理手法の検討 (ケース4) も行った。

(1) 従来の養浜の継続と中止

1996年からの養浜を継続した場合 (ケース1) と、養浜を中止した場合 (ケース2) の海浜背後の自転車道路ののり肩を基準にした今後10年間の浜幅変化量を図-6に示す。従来の養浜を継続した場合 (ケース1), 柳島海岸や中海岸, 菱沼海岸では現況汀線を維持するのみで, 汀線の前進を図ることはできない。一方, 辻堂海岸では汀線が前進傾向となり, その前進量は江の島に近づくにつれて大きい。このような地形変化の特徴は, 1996年以降の湘南海岸の実測地形変化 (Ishikawaら, 2009) と整合する。

一方, 養浜を中止した場合 (ケース2), 柳島消波堤の下手, 茅ヶ崎中海岸, 菱沼海岸, 引地川の下手で侵食が進み, 汀線が後退する。このことから, 現況汀線を維持するためには, 現在の2.3万 m^3/yr の養浜を継続する必要があることが明らかである。

(2) 計画汀線を達成するための土砂管理手法

計画汀線を達成するための土砂管理手法の最適案 (ケース3) における10年後までの浜幅の変化を図-7に示す。図に示すように, 茅ヶ崎中海岸で3.0万 m^3/yr , 柳島海岸で0.5万 m^3/yr の養浜を実施し, また辻堂海岸 ($X=4.5\sim 5.4$ km) から年間当たりの飛砂量程度1.5万 m^3/yr を採取し, そのうちの1.0万 m^3/yr を菱沼海岸 ($X=6.7\sim 6.9$ km) にサンドリサイクル (図矢印), 残りの0.5万 m^3/yr を片瀬西浜 ($X=2.2\sim 2.4$ km) にサンドバイパス (図矢印) することで, 10年後に防護上必要な計画汀線をほぼ達成することがで

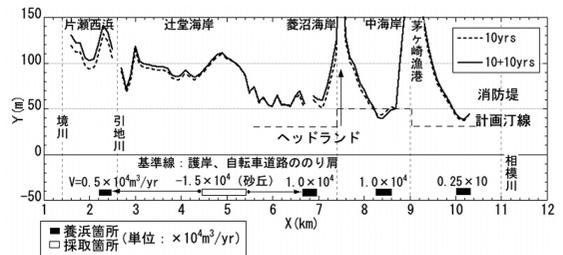


図-9 浜幅変化量 (ケース4)

きる事が分かる。また, サンドバイパス, サンドリサイクルを実施しても辻堂海岸の汀線が現状より後退しないことも明らかである。一方, 底質の変化については, 図-8に示す各粒径成分の含有率の沿岸方向分布より, 粗粒材を多く含む養浜を実施する中海岸では底質の粗粒化が進むことが分かった。

(3) 計画汀線達成後の海岸の土砂管理手法 (維持管理)

ケース3の予測結果を初期地形として, 計画汀線達成後汀線を維持するために必要な土砂管理手法の検討として, 養浜量を変えた計算を行った結果, 得られた最適案 (ケース4) の10年後の浜幅変化量を図-9に示す。茅ヶ崎中海岸で1.0万 m^3/yr , 柳島海岸で0.25万 m^3/yr の養浜を行い, かつ辻堂海岸から菱沼海岸へのサンドリサイクルを1.0万 m^3/yr , 片瀬西浜へのサンドバイパスを0.5万 m^3/yr 行うことで, 10年後も海浜 (汀線) を維持することができる。なお, この場合であっても辻堂海岸の汀線が現状より後退することはない。

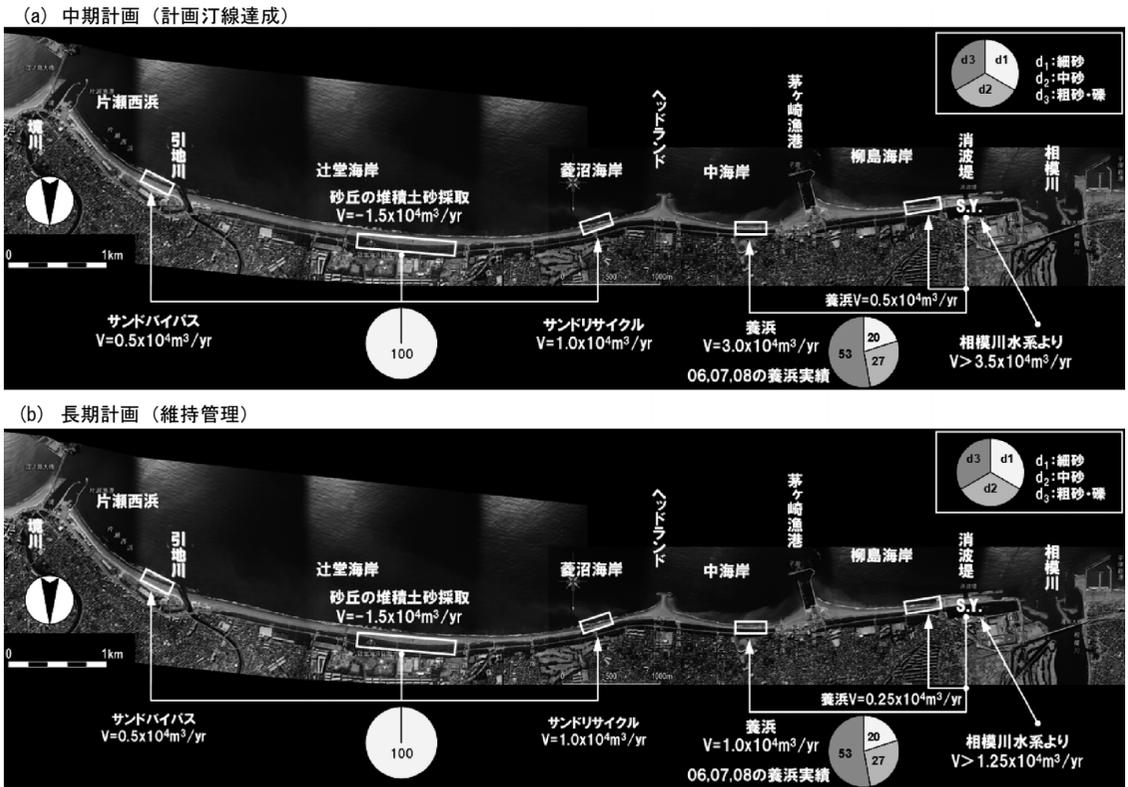


図-10 湘南海岸における土砂管理計画（案）

4. まとめ

本研究では、漂砂系全体として相模川河口から江の島まで10kmの海岸線全体を取り上げ、相模川からの土砂流入や飛砂による海岸線からの細砂の損失も含めた1945年から2007年までの地形変化を再現し、このモデルを用いて海岸の土砂管理について検討を行った。この結果、飛砂による堆積土砂の有効活用を含め、粒径を考慮した広域の土砂管理による海岸保全効果を定量的に評価することができた。具体的には、図-7に示したように粗砂や礫を50%程度含む相模ダムの深渚土砂などを用いた粗粒材養浜を、中海岸で3.0万m³/yr、柳島海岸で0.5万m³/yr実施することで、10年後に計画汀線を達成可能なことがわかった。また堆積域の辻堂海岸から年間当たりの飛砂量程度1.5万m³/yrを採取し、菱沼海岸に1.0万m³/yr投入するサンドリサイクルと、片瀬西浜に0.5万m³/yr投入するサンドバイパスを実施することで、菱沼海岸では10年後に計画汀線を達成し、かつ採取地である辻堂海岸の汀線を後退させることもないことがわかった。一方、維持管理については、図-9に示したように中海岸と柳島海岸への養浜量をそれぞれ1.0万m³/yr、0.25万m³/yrに減量して継続し、かつ辻堂海岸から菱沼海岸にサンドリサイク

ル1.0万m³/yr、片瀬西浜にサンドバイパス0.5万m³/yrを継続することで、さらに10年後も海浜（汀線）を維持可能なことがわかった。図-10はこれらの結果をとりまとめた湘南海岸における土砂管理計画（案）である。

参考文献

- 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.
- 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.
- 宇多高明・木下幸夫・山野 巧・吉岡 敦・三波俊郎・壺岐信二・石川仁憲（2006）：長期深淺測量データに基づく湘南海岸の海浜変形の実態分析，海岸工学論文集，第53巻，pp. 651-655.
- 宇多高明・青島元次・鮫島 強・吉岡 敦・古池 鋼・石川仁憲（2008）：広域地形・粒径変化予測モデルの湘南海岸への適用，海岸工学論文集，第55巻，pp. 606-610.
- 石川仁憲・宇多高明・青島元次・吉岡 敦・三波俊郎（2008）：海岸保全とサーフィン利用の観点から見た台風9号による湘南海岸への影響，海洋開発論文集，第24巻，pp. 441-446.
- Ishikawa, T., T. Uda, T. San-nami, G. Aoshima and A. Yoshioka（2009）：Comprehensive management of sand considering grain size on Shonan coast, Proc. Coastal Dynamics 2009, Paper No.71.