

砂浜による海岸保全を図るための土砂管理と新しい養浜手法の研究

平成 27 年 10 月

石 川 仁 憲

## 目 次

1. 序論	1
1.1. 研究の背景	1
1.2. 既往研究と課題	3
1.3. 研究目的と本研究の特徴	4
1.4. 研究概要	5
参考文献	6
2. 海岸保全施設としての砂浜の基本的考え方	8
2.1. 緒言	8
2.2. 砂浜の計画	8
2.3. 砂浜の設計	10
2.4. 砂浜の施工	20
2.5. 砂浜の管理	22
2.6. 結言	24
参考文献	24
3. 砂浜による海岸保全を図るための土砂管理手法	25
3.1. 緒言	25
3.2. 粒径を考慮した土砂管理手法の考え方と検討方法	25
3.3. 粒径を考慮した土砂動態の解析（湘南海岸の例）	30
3.4. 土砂管理手法の検討（湘南海岸の例）	42
3.5. 結言	54
参考文献	54
4. 新たな養浜手法 I	56
4.1. 緒言	56
4.2. 適切な混合粒径材料を用いて海岸全域の保全を図る養浜手法の提案	56
4.3. 新たな養浜手法の検討（茅ヶ崎中海岸の例）	61
4.4. 新たな養浜手法の海岸保全効果（茅ヶ崎中海岸の例）	71
4.5. 結言	81
参考文献	81



5. 新たな養浜手法Ⅱ：Moving Gravel Body 工法	82
5.1. 緒言	82
5.2. 一方向沿岸漂砂が卓越する海岸での粗粒材養浜の効果（遠州灘篠原海岸の例）	82
5.3. 一方向沿岸漂砂が卓越する海岸での粗粒材養浜の効果（静岡県富士海岸の例）	94
5.4. MOVING GRAVEL BODY 工法の提案	101
5.5. MOVING GRAVEL BODY 工法のコンセプト	109
5.6. 結言	112
参考文献	112
6. 結論	114
6.1. 砂浜による海岸保全を図るための土砂管理手法	116
6.2. 適切な混合粒径材料を用いて海岸全域の保全を図る新たな養浜手法	117
6.3. MOVING GRAVEL BODY 工法	118
参考文献	118
謝 辞	120

## 1. 序論

### 1.1. 研究の背景

1999 年に改訂され、2000 年に施行された新海岸法では、砂浜が海岸保全施設として位置付けられた (**Fig. 1.1.1**)。しかしながら、これまでの海岸保全が主として堤防、護岸、離岸堤など海岸構造物を中心に行われてきたこともあり、基準書等には、砂浜づくり（養浜）や砂浜の管理についての技術的な知見が乏しかった。砂浜や養浜について記述のある 2000 年以前に発刊された主な基準書等は、「改訂海岸保全施設築造基準解説」<sup>1)</sup> (1987)、「面的な海岸防護方式の計画・設計マニュアル」<sup>2)</sup> (1991)、「ビーチ計画・設計マニュアル」<sup>3)</sup> (1992)、「海岸施設設計便覧」<sup>4)</sup> (2000) などがあり、それらには養浜の設計手法が述べられている。ここで、養浜の形態には、漂砂制御施設の設置により漂砂量を極力少なくし、砂浜の静的な安定を目指す静的養浜と、沿岸漂砂による養浜材の流出を許容し、漂砂下手への土砂供給源として海浜の安定化を図る動的養浜に分類されるが (**Fig. 1.1.2**)、これらの基準書等はいずれも静的養浜を主としたものであり、動的養浜についての技術論は不十分であった。また、静的養浜の記述においても、断面諸元の設定方法に課題が残されていることや、養浜砂が一般には混合粒径であることが考慮されていないなど、技術上の問題を抱えていた。海岸法の改正後の 2004 年に発刊された「海岸保全施設の技術上の基準・同解説」<sup>5)</sup> においても同様に、動的養浜に関する技術的な記述は不十分であった。

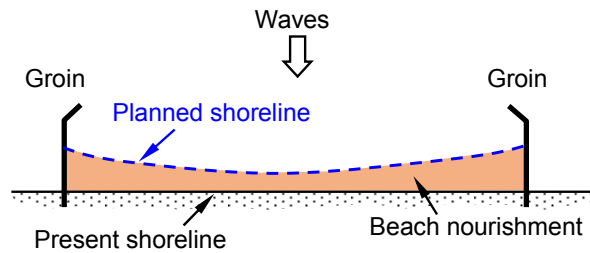
動的養浜は、養浜材を沿岸漂砂の上手側等に局所的に投入することで、人為改変の範囲をできる限り狭くし、養浜材の移動・拡散を波の作用に任せることで、養浜による自然環境や海浜利用への影響を極力抑えて自然回復を図ることが可能である。2000 年以前の国内での動的養浜の実施例は、古くは 1948 年頃に実施された新潟西港から漂砂下手側海岸へのサンドバイパス<sup>6)</sup>をはじめ、1983 年から行われた静岡県大井川港南側海岸から漂砂下手側の駿河海岸へのサンドバイパス<sup>7)</sup>、1986 年頃に実施された天橋立でのサンドバイパス<sup>8)</sup>、漁港管理者と海岸管理者間で締結した協定に基づき 1987 年より実施されている富山県宮崎漁港・大屋海岸<sup>9)</sup>、1996 年から毎年 10 万 m<sup>3</sup>の養浜を実施している静岡県富士海岸<sup>10)</sup>、1994 年より鳥取県皆生海岸で実施されたサンドリサイクル<sup>11)</sup>など、いくつかの事例があるが、いずれも事業実施前に、養浜材の粒径までを考慮した定量的な保全効果の検討はなされていない。一方、海外の動的養浜の実施例としては、1935 年以降、アメリカ西海岸の Santa Barbara 港で行われている例<sup>12)</sup>や、1986 年より実施されたオーストラリアの Goldcoast、米国の西海岸<sup>13)</sup>をはじめ古くから諸外国で多く実施されていた。しかし、これらはいずれも細砂からなる緩勾配の海浜での養浜であり、わが国のように比較的海底勾配が急で、様々な粒径の底質から構成される海岸にあっては、諸外国の手法をそのまま適用できない。

一方、海岸法第 2 条によれば、海岸保全施設としての「砂浜」は、高潮および波浪から海岸背後にある人命・資産を防護すること、若しくは堤防等の洗掘を防止すること又はその両方を目的として、海岸保全施設として指定されたものをいう。養浜はこの目的を達成するために、消波による越波・うちあげ高の低減や、背後の堤防・護岸の洗掘防止を目的として行われるものであるが<sup>5)</sup>、動的養浜は、養浜材の流出を前提とする手法であることから、その効果を十分に説明しない限り、砂浜を海岸保全施設に位置付けて養浜事業を実施することは困難であった。例えば、養浜材の侵食海岸への寄与率を時間・空間的に予測し、必要な砂浜の防護機能が確実に確保されることを定量的な意味から評価することが必要とされた。そこで、筆者らは 2005 年に「実務者のための養浜マニュアル」<sup>14)</sup>を作成し、主に動的養浜に注目して、養浜による海岸保全効果を定量的に評価する設計方法を取りまとめた。その後、今日にいたるまで全国各地で養浜事業が進められているが、継続的に養浜を実施するために、より海岸保全に効果的な養浜手法で、経済的に優れた手法が模索されている。



**Fig. 1.1.1** Example of the sandy beach (Enshunada Coast) .

(a) Static beach nourishment



(b) Dynamic beach nourishment

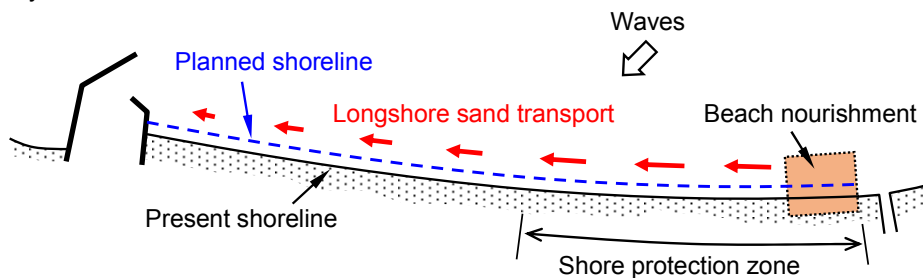


Fig. 1.1.2 Concept of static and dynamic beach nourishment.

## 1.2. 既往研究と課題

護岸や堤防等の海岸保全施設の建設は、公共事業であるがゆえに施設の永続性が強く指向され、極力建設後の維持管理を不要とする施設づくりに主眼が置かれてきた。これに対し、養浜は、砂浜が波浪や潮位の作用により絶えず変化する特性から、施工後の維持管理が重要となる。とくに動的養浜は、維持管理を適切に継続することで機能維持を図るものであり、これを含めて公共事業としての永続性が確保される。また、多くの場合、将来にわたって継続する必要があることから、安価で長期的に安定した養浜材の供給が可能でなければならない。そのためには、投入した養浜材も含めて、海岸の限られた砂を有効活用し、一連の漂砂系において適切な土砂管理により砂浜を維持することが経済的にも優れる。しかし、これまでにそのような手法はとりまとめられていない。適切な土砂管理を行うには、対象海岸の土砂動態を把握し、海岸の堆積・侵食・安定傾向を調べ、海岸特性を明らかにする必要がある。「実務者のための養浜マニュアル」<sup>14)</sup>でもその手法もとりまとめた。しかしながら、粒径により土砂動態が異なるため、従来の方法では、質までも考慮した土砂管理を行うには不十分であった。

一方、「実務者のための養浜マニュアル」<sup>14)</sup>で述べたように、養浜材の粒径によって保全効果が大きく異なる。現地の前浜底質に対して粒径が細かい養浜材を用いた場合は、平衡勾配が小さいことから養浜材の安定性が低く、沖へ流出しやすい。一方、礫などの粗粒材の場合は平衡勾配が大きいため安定性が高く、前浜の拡幅に効果的である。このような考えを基に、2005年以降、第一義的に汀線の前進を図ることを主眼として、歩留まりの良い礫を用いた粗

粒材養浜が数箇所で行われた<sup>15)</sup>。例えば、鹿島灘に面した神向寺海岸<sup>16)</sup>では、2006年から2009年にかけて6号7号砕石8.7万m<sup>3</sup>を用いた粗粒材養浜が行われた。また神奈川県の高谷海岸<sup>17)</sup>では、現地海浜の底質中央粒径 $d_{50}=0.1\sim0.3$  mmに対し、15 mmの礫を用いた粗粒材養浜が行われた。これらの海岸では、投入した礫は護岸前面に急勾配で堆積し、高波浪の作用を受けても沖への流出はほとんどなく安定性が高いことが確認された。このように粗粒材を用いた養浜は、海岸保全に効果的であるが、これらの海岸はいずれも両端がヘッドランドか岬によって囲まれたポケットビーチであり、養浜材の沿岸方向の移動を許し、継続的に養浜を行う動的養浜ではない。一方、一方向沿岸漂砂が卓越する神奈川県の湘南海岸、静岡県富士海岸、遠州灘等では、侵食対策として動的養浜が進められたが、動的養浜は、継続の実施によって砂浜の保全機能の維持を図ることから、将来に渡って安定的な養浜材の確保と、より海岸保全に効果的で、経済的に優れた手法が必要とされている。「実務者のための養浜マニュアル」<sup>14)</sup>では、養浜による海岸保全効果を定量的に評価する手法はとりまとめたが、当時は動的養浜に関する技術的な知見が乏しかったため、継続的に養浜を実施するためのより効果的な手法に関する検討が不十分であった。

### 1.3. 研究目的と本研究の特徴

砂浜による海岸保全を進めるために、本研究では、まず砂浜に関するこれまでの研究実績や様々な養浜事業に携わった経験より、海岸保全施設としての砂浜の基本的な考え方をとりまとめた。次に、安定的な養浜材の確保と経済的な手法として、海岸の限られた砂を有効活用し、一連の流砂系において質（粒径）までも考慮した適切な土砂管理により砂浜を維持する方法を検討した。この結果も参考にして、より効果的かつ経済的な新たな養浜手法として、流砂系の土砂連続性の観点に基づき、ダム堆砂を活用して適切な粒度組成の混合粒径材料を用いた、前浜だけでなく沖合も含めて海岸全域の保全を図る手法について提案した。さらに、一方向沿岸漂砂が卓越する海岸において継続的に実施されている粗粒材を用いた動的養浜の保全効果を分析し、このような海岸における新たな養浜手法 Moving Gravel Body 工法を提案した。

先にも述べたように、砂浜が海岸保全施設として位置付けられたが、従来の基準書等には、砂浜づくり（養浜）や砂浜の管理についての技術的な知見が乏しく、「実務者のための養浜マニュアル」<sup>14)</sup>においても、より海岸保全に効果的で、経済的に優れた養浜手法について、具体的に明らかにされていない。本研究は、侵食問題を抱える海岸において、土砂管理計画を提案するとともに、計画、設計、施工、維持管理までを実施し、実際に砂浜が復元した海岸の事例を基に、新たな養浜手法を提案したものであり、養浜による砂浜づくりや砂浜管理を行う実務者にとって大い役立つと考えられる。

## 1.4. 研究概要

近年わが国では、多くの海岸で海岸侵食が問題となっている。海岸侵食は、地盤沈下や地殻変動に伴う陸地の沈降、海面上昇を除くと、沿岸漂砂の移動を阻止する岬や大規模な岩礁、あるいは大規模な防波堤などに挟まれた一連の漂砂系の中で、河川や海食崖などからの供給土砂量の減少、防波堤や導流堤等による沿岸漂砂の遮断、波の遮蔽域の形成、さらには海砂採取といった人為的な要因によって生じる。また、駿河湾、富山湾、相模湾等の急深な湾に面した海岸でみられる海底谷を経由した深海への土砂流出や、多くの海岸でみられる飛砂による陸域への流失は、流出土砂量が上手側から供給される漂砂量と均衡している限りにおいては侵食要因となり得ないが、前述したように供給土砂の減少や沿岸漂砂の連続性が断たれた場合にはこれらの土砂損失は深刻な問題となる。このように様々な要因<sup>18)</sup>で起こる海岸侵食に対して、従来、離岸堤や消波堤等の構造物により侵食対策が図られてきた。しかしながら、一方沿岸漂砂が卓越する海岸では、時間の経過とともに侵食域が構造物の下手側へと次々と広がっていき、問題解決を先送りするのみで、抜本的な対策ではなかった。また、構造物の背後では土砂が堆積し、海岸保全が図られるが、その沖合では依然として沿岸漂砂が通過するため、侵食速度の軽減には役立っても次第に侵食は進み、安定海浜の形成を促すことは困難であった。したがって、自然海浜をできる限り良好に保つには、継続的な動的養浜を実施し、砂浜による海岸保全を図っていく以外の方法はない。そのためには、対象海岸の土砂動態を十分把握し、効果的かつ経済的な手法で継続的に動的養浜を行いつつ、一連の漂砂系において適切に土砂管理（サンドバイパス、サンドリサイクル）を行っていく必要がある。

本論文は序論から結論までの6章で構成し、各章の概要は以下の通りである。

第1章では、序論として研究の背景、既往の研究と課題、研究目的と本研究の特徴および研究概要について述べた。

第2章では、砂浜に関するこれまでの研究実績や様々な養浜事業に携わった経験より、海岸保全施設としての砂浜の基本的な考え方をとりまとめ、砂浜の計画、設計、施工、管理の方法や留意点を提案した。

第3章では、砂浜による海岸保全を図るための土砂管理手法について、その考え方や検討方法を提案し、神奈川県湘南海岸を例に、粒径を考慮した土砂動態の解析と土砂管理手法（養浜、サンドバイパス、サンドリサイクル）について検討した結果をとりまとめた。

第4章では、より効果的かつ経済的な新たな養浜手法として、流砂系の土砂連続性の観点に基づき、本来、海岸への土砂供給源であった流砂系（河川、ダム）の堆砂を活用し、適切な粒度組成の混合粒径材料を用いて、前浜だけでなく沖浜も含めて海岸全域の保全を図る手法について提案した。次に、湘南海岸の上手側に位置し、2005年までに著しい侵食が起きた茅

ヶ崎中海岸を例に、現地データの解析や数値計算による養浜手法の検討方法を取りまとめた。さらに、同海岸において実際に養浜が行われたことから、養浜後の地形変化より、新たな養浜手法の妥当性を評価した。

第 5 章では、2005 年より粗粒材養浜が継続的に行われている静岡県遠州灘の浜松篠原海岸、1996 年より粗粒材養浜が継続的に行われている富士海岸を例に、動的養浜による海岸保全効果を分析し、その結果をふまえ、一方向沿岸漂砂が著しく卓越する海岸における新たな養浜手法として、Moving Gravel Body 工法を提案した。

第 6 章では、結論として、「砂浜による海岸保全を図るための土砂管理手法」、より効果的かつ経済的な新たな養浜手法として、流砂系の土砂連続性の観点に基づき、「適切な混合粒径材料を用いて海岸全域の保全を図る養浜手法」、さらに、一方向沿岸漂砂が著しく卓越する侵食海岸において、現地海岸の底質に比べて適度な大きさの粗粒材を投入することで、下手側海岸に著しい侵食を引き起こすことなく、海岸保全を図ることができる新たな養浜手法「Moving Gravel Body 工法」について要約した。

## 参考文献

- 1) 海岸保全施設築造基準連絡協議会編：「改訂海岸保全施設築造基準解説」, pp. 235-242, 1987.
- 2) 日本港湾協会：「面的な海岸防護方式の計画・設計マニュアル」, 1991.
- 3) 社団法人日本マリナー・ビーチ協会：「ビーチ計画・設計マニュアル」, 1992.
- 4) 土木学会：「海岸保全施設設計便覧」, 2000.
- 5) 海岸保全施設技術研究会編：「海岸保全施設の技術上の基準・同解説」, pp. 3-121-3-127, 2004.
- 6) 永井康平：海浜の今日的意義と養浜の必要性, 港湾技術要報, No. 73.
- 7) 佐口光明：駿河海岸のサンドバイパス, 河川, No. 544, 1991.
- 8) 陳 活雄・山田 稔・土屋義人：天橋立海岸におけるサンドバイパス工法による動的安定海浜の形成, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 541-545, 1993.
- 9) 阿部呂夫：大屋海岸のサンドバイパス, 河川, No. 544, 1991.
- 10) 佐藤慎司・山本幸次・桜井 亘・村野幸宏・高木利光・厚坂祐次：富士海岸における侵食対策としての動的養浜の効果, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 676-680, 1999.
- 11) 佐藤慎司・古屋隆男・坂根博吉・山本幸次・田子洋一・牧野一正：弓ヶ浜海岸におけるサンドリサイクルシステムの有用性, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 686-690, 1999.
- 12) U. S. Army Coastal Engineering Research Center : Shore Protection Manual, Volume II, pp. 6-63-6-64, 2002.
- 13) 田中則男・小笠原昭・小山内英雄：養浜工に関する研究（その 1）, 港湾技研資料, No. 260, pp. 5-32, 1977.
- 14) 宇多高明・石川仁憲：「実務者のための養浜マニュアル」, (財) 土木研究センター, p. 170, 2006.
- 15) 石川仁憲, 宇多高明：閉空間と開空間での粗粒材養浜がもたらす効果・影響の相互比較, 土木

学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 67, No. 2, p.I\_1153-I\_1158, 2011.

- 16) 松浦健郎, 宇多高明, 諏訪義雄, 山田浩次, 福本崇嗣: 砂浜の海岸保全施設指定に向けた粗粒材養浜の有効性の検討, 海洋開発論文集, 第 25 巻, pp.1119-1124, 2009.
- 17) 宇多高明, 小林昭男, 篠原大起, 野志保仁, 遠藤将利: 秋谷海岸における磯養浜の追跡調査, 日本沿岸域学会研究討論会 2009 講演概要集, No.22, pp.95-98, 2009.
- 18) 宇多高明: 「日本の海岸侵食」, 山海堂, p. 422, 1997.



## 2. 海岸保全施設としての砂浜の基本的考え方

### 2.1. 緒言

新海岸法では、第2条1項の規定により海岸管理者が「砂浜」を海岸保全施設として指定できるようになった。砂浜は消波機能に加え、構造物の根固め機能、動物・植物の生息環境機能、水質浄化機能、レクリエーションや学習の場としての機能など様々な機能を有することから、従来の構造物による保全手法に代わり、今後多くの海岸で砂浜による保全（養浜）が進められる可能性が高い。しかしながら砂浜は従来の保全施設の考え方と大きく異なる特徴を有している。例えば、護岸などの海岸保全施設は基本的に被災しない限り施設の一定の機能が長く保持されるのに対し、砂浜では砂が絶えず動きながらある形状が保たれることに特徴がある。その変動も、長期的変化に短期的変動が重なっている。このため、砂浜の管理は時間・空間的にある程度の変動を許容して実施する必要がある、またそれを許さない設計では砂浜としての本質を失うことになる。一方、砂浜の設計では、従来の保全施設と同様、目的達成のための施設設計が必要とされる。このように砂浜は、管理と設計で考え方や設定諸元が異なることが特徴である。養浜の計画・設計・管理に関する考え方について、「実務者のための養浜マニュアル」<sup>1)</sup>では2005年当時での最新の知見をとりまとめたが、砂浜に関する科学的知見には未解明な部分も多く、日々更新されている状況である。そこで、2章では、砂浜による海岸保全をより確実に実施するために、砂浜の計画（最適な養浜材の考え方）、設計、施工（養浜材の指標）、管理の方法や留意点について新たな知見をもとに整理した<sup>2)</sup>。

### 2.2. 砂浜の計画

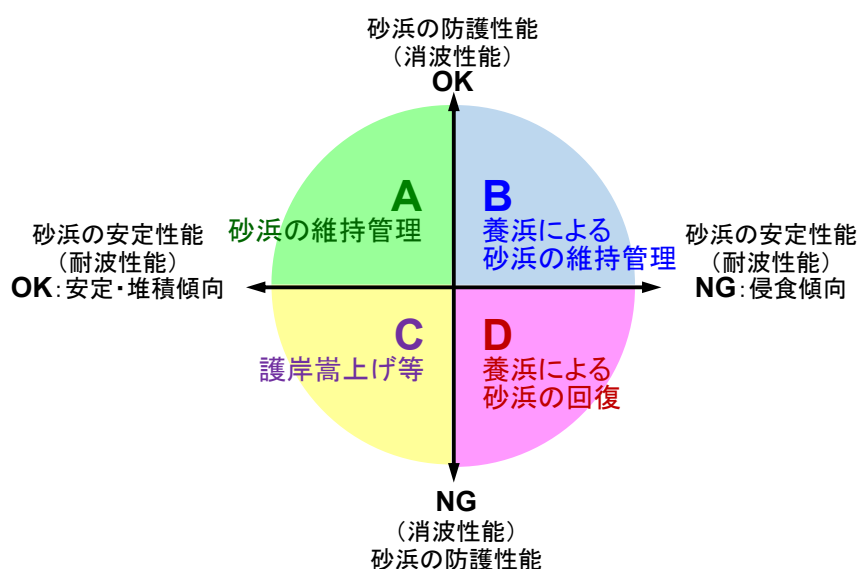
砂浜を計画するにあたって、砂浜を海岸保全施設として位置付けた場合、砂浜には安定性能と防護性能が基本的に求められることから、これら2つの性能を評価しなければならない。

砂浜の安定性能については、波浪、飛砂およびその他の作用による長期的および短期的な海浜変形に対して適切な安定性を有し、海浜変形が生じた場合においても、防護上必要な浜幅の確保が要求される。したがって、計画段階において、長期的にみた場合に、砂浜が安定傾向（堆積傾向）、もしくは侵食傾向であるのかを評価する。なお、ある程度侵食を許容しても現状の砂浜が防護性能を満足する場合であっても、背後施設の被災などを防ぐため、防護性能を満足する限界まで侵食を許容するのではなく、また美しいなぎさの継承、国土保全の観点から、現在の砂浜を維持するべきである。

砂浜の防護性能については、砂浜の消波機能による背後地への海水の浸入防止、越波流量を許容量以下に減少、さらに根固め機能による護岸の安定などが要求される。したがって、砂浜の防護性能は、設計高潮位に、設計波浪を最大値とした波高と周期の組合せの波浪が来襲

した場合に、現状の砂浜が海岸保全基本計画で定めている防護水準を満足しているか否かを評価する。

ここで、計画段階では、**Fig. 2.2.1**に示すように、これら2つの性能をそれぞれ縦軸、横軸にとって、砂浜の整備（維持・管理）方針を決定すると良い。まず、現状の砂浜が安定傾向で、防護性能を満足している場合（Type A）は、飛砂による損失土砂のリサイクル、高波浪来襲後の対応などを行いつつ、現状の砂浜を維持・管理する。砂浜は侵食傾向であるが、防護性能を満足している場合（Type B）は、背後施設の被災を防ぐため、漂砂系外からの養浜や飛砂を含む漂砂系内でのサンドリサイクルなどにより、現在の砂浜を維持する。ただし、海水浴、地引網、サーフィン、散策など年間を通じて多くの人に利用されており、侵食により、海岸利用、環境に支障をきたしている場合は、利用、環境の改善を目的とした養浜が必要であろう。この場合の砂浜の回復目標は、侵食前の自然な砂浜の状況となる。砂浜が安定傾向で、防護機能を満足していない場合（Type C）は、養浜で砂浜を拡張するか、もしくは護岸の嵩上げ等によって対応する。砂浜が侵食傾向で、かつ現状の砂浜が防護性能を満足していない場合（Type D）は、養浜により早期に防護上必要な砂浜の回復を図る。砂浜回復後は Type B へランクアップし、回復後の砂浜の維持する。なお、沿岸毎に策定されている「海岸保全基本計画」において、砂浜の維持管理方針や目標浜幅が設定されている場合は、これも考慮する。これらの Type A～D のうち、対策の優先度が高いのは、侵食傾向でかつ防護機能が満足していない Type D、次に安定もしくは堆積傾向であるが防護機能が満足していない Type C、そして侵食傾向であるが現状ではまだ防護機能が満足している Type B となる。計画段階において、対象海岸が広域で、どの地先から保全事業を実施して良いか判断する際には、このような手法が有効である。



**Fig. 2.2.1** Concept of shore protection method by sandy beach.

## 2.3. 砂浜の設計

### (1)設計時の留意点

砂浜の防護機能は、1. 波浪エネルギーの減衰により波のうちあげ高や海岸背後への越波流量を低減させる消波機能、2. 洗掘防止による堤防・護岸等の安定性確保（根固め機能）であり、これらの機能は砂浜の断面諸元（後浜高、後浜幅、前浜・外浜勾配、波による地形変化の限界水深  $h_c$ ）によって評価できる。断面諸元のうち、海浜の特徴を表す後浜高、後浜幅、前浜勾配は従来の人工海浜の考え方<sup>3)</sup>にも取り入れられているが、海浜全体の安定性の議論には砂の移動範囲全体を含む領域を包含しなければならず、そのため波による地形変化の限界水深  $h_c$ を考慮する必要がある。一方、養浜においては、投入土砂の汀線付近への歩留まりを高めると同時に、漁業障害を除去する観点から、茨城県神向寺海岸では礫を用いた養浜も実施されている<sup>4)</sup>。この方法は、養浜砂が汀線付近に歩留まり、防護機能を維持しつつ外浜沖浜に生息するチョウセンハマグリ<sup>5)</sup>の生態に影響を与えないという点では評価できるが、礫養浜は常に有効とは限らない。例えば、相模湾に面する神奈川県茅ヶ崎中海岸<sup>5)</sup>では(**Fig. 2.3.1**)、侵食を受ける前は遠浅の海岸であった。**Fig. 2.3.2** は侵食が進んだ茅ヶ崎中海岸中央の測線 No.18 と、漂砂下手（東）側に位置するヘッドランドによる波の遮蔽域内を通る測線 No.11 における海浜縦断形と粒度組成の水深方向を示す。遮蔽域内の No.11 の縦断形はバームから汀線までが 1/10、汀線～-3m が 1/30 と相対的に急であるが、沖は 1/80 と非常に緩やかである。これに対応して汀線付近の中砂、粗砂が多く含まれ、沖は主に細砂で構成されている。一方、侵食域に位置する No.18 では、汀線～-1m が 1/10、-1m～-8m が 1/30 と急深で、 $h_c$  (-9m) 以深は 1/170 の緩斜面となっている。このことは野志ら<sup>6)</sup>が提案した局所勾配と粒径の関係を裏付ける結果でもある。

ここで、**Fig. 2.3.2** に示すように、-8m 以深では両測線上の底質はほぼ同じ値を示すが、-8m 以浅では No.11 が汀線付近までほぼ細砂で構成されているのに対し、No.18 では汀線に近づくにつれて礫や粗砂が多く含まれる。このことは、もともと海岸中央付近では沖浜も含めて細砂が大量にあったために緩勾配の海浜であったが、主要成分の細砂が、宇多ら<sup>4)</sup>が示したようにこの付近で卓越する東向きの沿岸漂砂により運び去られ、大量の細砂がこの測線付近から消失した結果急勾配となって粗粒の土砂が残されたと解釈できる。この場合、この海岸の  $h_c$  は -9m にあるので、侵食域では -9m 以浅の縦断形が次第に急勾配となりつつ後退してきたと考えられる。これら 2 断面の縦断形は東西に 700m 離れた測線の形状であり、同一時期の測定値である。しかし海浜変形のエルゴード性<sup>7)</sup>に基づく海浜変形の場所的变化は時間的变化を説明すると考えることもできる。**Fig. 2.3.2** はこれら 2 つ縦断形の特徴を模式化し、汀線を合わせて重ねたもので、侵食が進んで緩勾配であった海底が次第に急深となる状

況を示す。急深になったことで、例えば・5m で碎ける波は約 100m 岸に近づき、防護上危険側にシフトしていることが分かる。このような縦断形の特徴は、細砂で構成され比較的緩やかな海底勾配を有する海岸が該当する。沖に細砂があることは、沿岸砂州（バー）の形成を促し、それによって消波効果が発揮されるとともに、漁業（しらす漁や地引網）にも有効である。一方、バーの消失は、サーフィンなどの利用面にも重要な影響をもたらす。したがって、このような海岸で礫などの粗粒材のみで養浜を行った場合、汀線付近に急勾配の前浜は形成されるが、沖合は急深な縦断形とならざるを得ない。すなわち沖合を構成している細砂が大量に補給されて初めて緩勾配の縦断形となると考えられる。粗粒材のみでは沖の海底勾配を緩くする効果はなく、しかも沖の緩斜面を構成する細砂は次第に沿岸漂砂によって運び去られるため、海浜縦断形は時間経過とともに急勾配化することが免れない。これより沖浜も含めて保全するには、粗粒材のみではなく細砂との混合粒径にすることが望ましいといえる。

以上のことから、本来、細砂中砂で構成された遠浅の海岸の場合、目標浜幅の確保や護岸の根固め機能としては、汀線付近に留まる粗粒材の投入が有効であるが、沖合の細粒土砂の減少は防護面だけでなく、漁業やサーフィンなどの利用面・環境面にも影響を与えるため、防護・環境・利用の全てにおいて理想的な遠浅な海岸を復元させるには、沖を構成する細粒材も必要であり、最適な養浜材は現地海岸の  $h_R \sim h_c$  に分布する底質と同程度の粒径を有する養浜材と結論付けられる。ただし、細砂など細粒材は礫に比べて動きやすく、沿岸漂砂によって下手側海岸へ運ばれやすく歩留まりが悪いため、沿岸漂砂が著しい海岸にあっては大量の養浜材が必要になる。

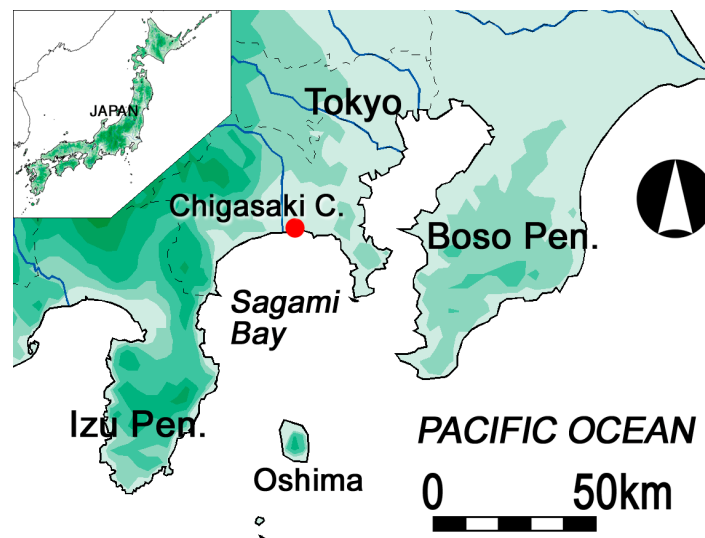
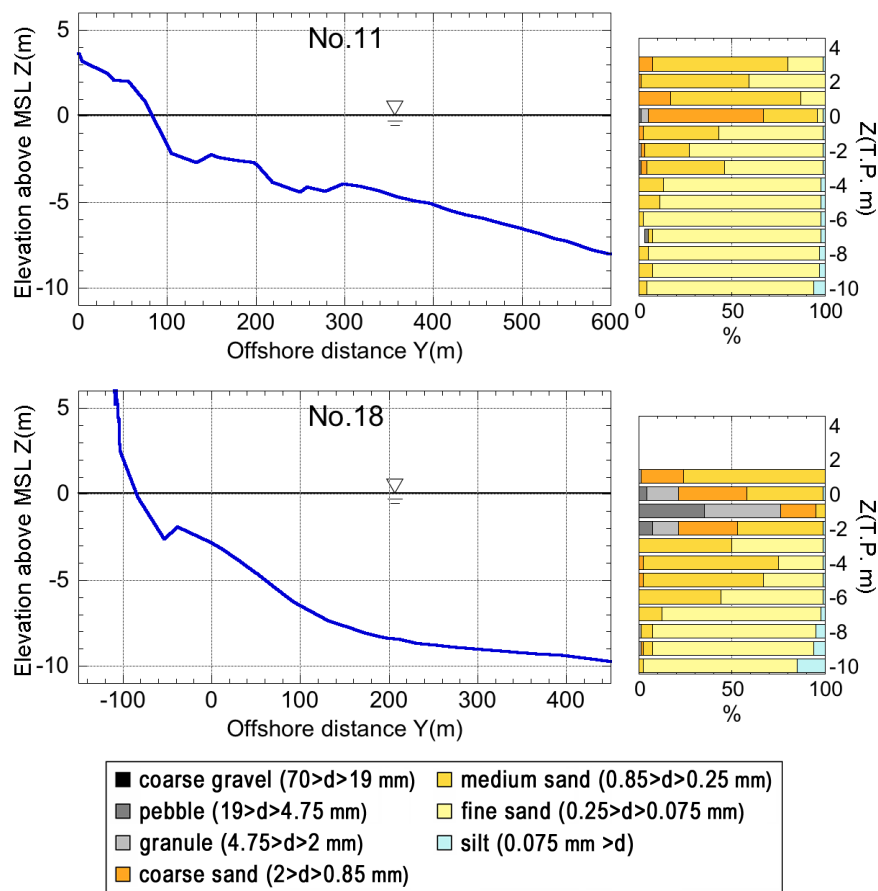
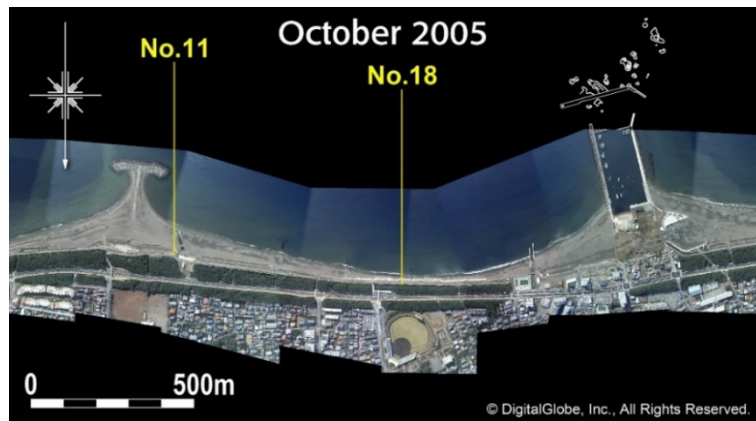


Fig. 2.3.1 Location of Chigasaki coast.



**Fig. 2.3.2** Longitudinal profile and depth distribution of composition of bed materials along transect No. 11 and No. 18 in 2005.<sup>2)</sup>

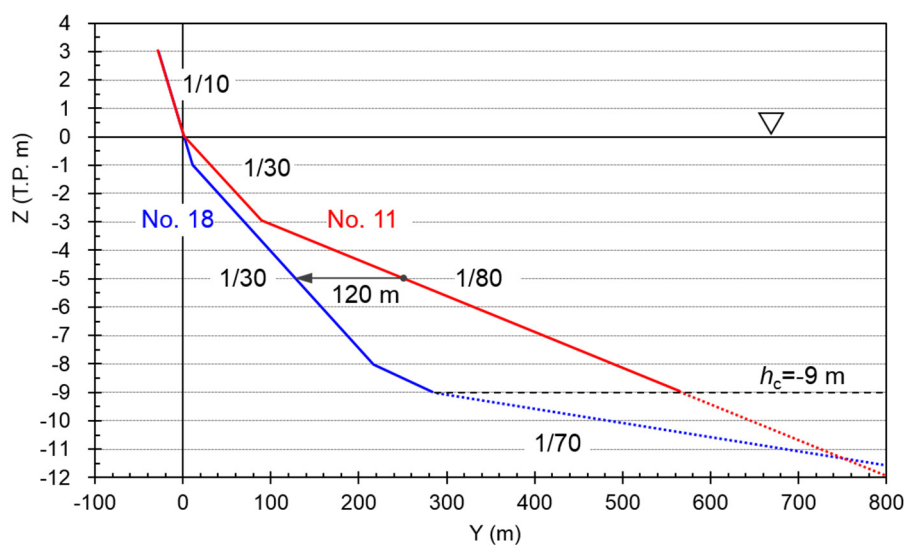


Fig. 2.3.3 Comparison of Longitudinal profile along transect No. 11 and No. 18 in 2005. <sup>2)</sup>

## (2)砂浜の断面諸元の設計方法

砂浜の断面諸元の設計は、**Fig. 2.3.4** に示すように、まず要求性能を設定し、そして防護水準，必要に応じて目標とする海浜像を設定する．次に現状海浜が防護水準や目標海浜像に対して満足しているかを評価し，この結果をふまえて，砂浜の断面形状を様々変えた場合の性能評価を行い，最終的に要求性能を満足する最適な断面諸元を決定する．

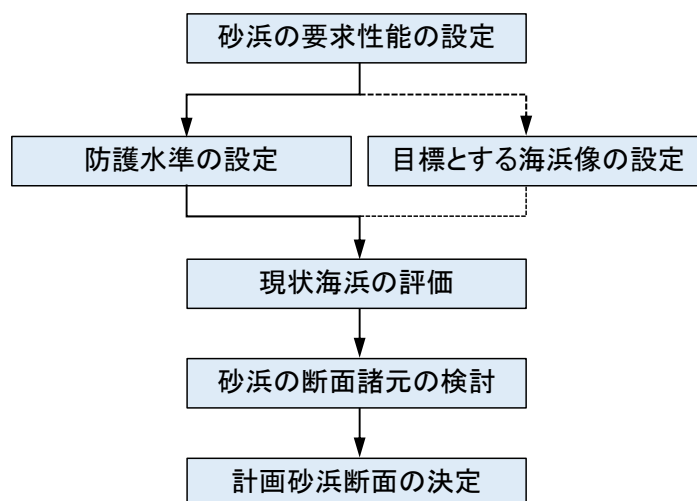


Fig. 2.3.4 Design procedure for beach profile.

砂浜の要求性能は、目的を達成するための性能として、消波機能により高潮，波浪または津波による海水の浸入を防止し，越波流量を許容量以下に減少させること，根固め機能による堤防・護岸等の構造の安定，必要に応じて海岸環境および海岸利用を向上させることである．

また、安全性能として、沿岸漂砂の不均衡、不連続による数十年スケールの不可逆的な長期的地形変化、および季節変化やひと時化の高波浪時に侵食し、静穏時に堆積するといった繰り返し生じる可逆的な変化、およびこれに沿岸漂砂の要因が加わった短期的な地形変化に対して適切な安定性を有することである。そのため、設計においてはこれら二つの変化が生じて汀線が後退した場合においても、波浪が背後地に影響を及ぼさないために必要な浜幅（汀線の後退限界位置）、もしくは利用目的に応じた浜幅が確保されなければならない。砂浜の防護機能を照査する断面の特性は、**Fig. 2.3.5** に示す断面諸元によって定められる。断面諸元は「実務者のための養浜マニュアル」<sup>1)</sup> に示したように、①後浜高(高潮位時の遡上限界≡バーム高  $h_R$ )、②波による地形変化の限界水深  $h_c$ 、③前浜・外浜勾配  $\tan \beta$  ( $h_c$ ～高潮位時の遡上限界≡ $h_R$ の海浜勾配、養浜材の底質  $d_2$ に關係)、および防災機能が發揮される④必要後浜幅  $B^*$  (高潮位時の遡上限界≡ $h_R$ ～護岸等の距離)であり、設計ではこれら諸元を検討する。なお、一般に前浜の沖側から碎波点までを外浜と呼ぶが、地形的には前浜から碎波点を越えて  $h_c$  まで連続した縦断形を呈しており、 $h_c$  を境に底質が異なるなど特徴が見られることから、砂浜を考える場合は  $h_c$  までを外浜とすることを提案する。設計後浜幅  $B_D$  については、波浪が背後地に影響を及ぼさないために必要とされる幅  $B^*$  (汀線の後退限界位置)として波のうちあげ高や許容越波量より定めるが、前述のように高波浪時の一時的な汀線の後退や長期的な侵食により汀線が後退した場合においても防護機能を確保できるように設定する必要がある。よって設計後浜幅は式 (1) で与えられる。

$$B_D = B^* + \Delta Y_1 + \Delta Y_2 = B_o + \Delta y + \Delta Y_1 + \Delta Y_2 \quad (1)$$

ここに、 $B_D$ ：設計後浜幅、 $B^*$ ：防護・環境・利用の観点から設定した必要後浜幅、 $\Delta Y_1$ ：長期的な汀線の後退量（沿岸漂砂による汀線後退量）、 $\Delta Y_2$ ：高波浪時における汀線の後退量、 $B_o$ ：現在の後浜幅、 $\Delta y$ ：目標汀線前進量である。なお、防護機能の照査は  $B^*$  について行う。これら項目のうち、 $\Delta Y_1$  と  $\Delta Y_2$  は安全性能確保のために見込む項目である。 $\Delta Y_1$  は、動的養浜の場合、等深線変化モデルなどを用いて設定する。一方、静的養浜の場合は併用された漂砂制御施設の影響は予め  $B^*$  の中に含めることが可能であり、この項については考慮しなくてよい。 $\Delta Y_2$  については、現時点では実用的な研究成果が少ないため、対象海岸やその周辺海岸での高波浪による地形変化の測量結果、空中写真等から得られる実際の汀線後退量を参考として設定する。

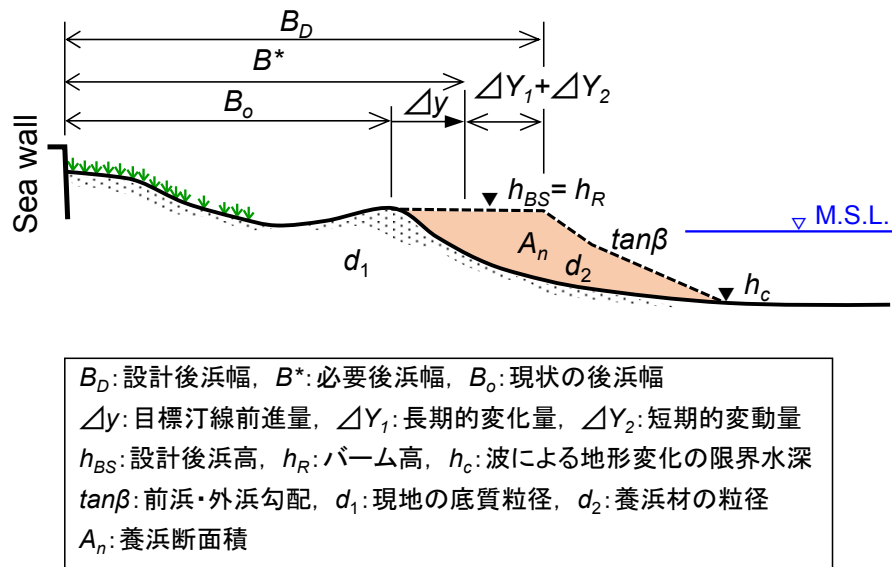


Fig. 2.3.5 Planned beach profile and principal specifications. <sup>2)</sup>

内湾の干潟を除けば、一般に海浜はバー・トラフの発達する遠浅の緩勾配海岸（タイプ a）と汀線付近が急深でバー・トラフを持たない急勾配海岸（タイプ b）の二つに類型化できる。タイプ a は主に細砂で構成され、海底勾配も 1/50～1/80 と緩やかであり、波浪の強弱に応じた短期変動を有し、高波浪時には前浜が削られ砂が沖へと移動しバー・トラフが形成される。これは海底勾配の緩い海岸の沖合に汀線と平行に形成される地形で、バーは周辺より頂部の水深が小さいことから碎波が生じ、人工リーフと同様に消波機能を発揮する。一方、波形勾配の小さい静穏の状態が続くと再び前浜に砂が堆積し、バームが形成される。このような地形変化は、沿岸漂砂によって土砂が運び去られて生ずる侵食・堆積といった長期的変化とは全く別の現象であり、ネットとしての海浜土砂量はほぼ一定値を保つ。したがって、このような短期的変動を長期的ないし地形学的に大きな規模で生起している現象と誤認すると、誤った対策手法を選択してしまう可能性が高まるので注意が必要である。タイプ b の海岸は主に礫で構成され、前浜勾配は 1/3～1/10 と急であり、Fig. 2.3.6 に示すように高波浪時には礫が護岸前面に堆積する特徴がある。タイプ a では波浪の強弱に伴う海浜の季節変動が顕著であるが、タイプ b ではその種の変動は大きくない。また、顕著な離岸流が発達するのはタイプ a の緩勾配海岸であり、これに関係したラージカスプの沿岸方向の分布に起因する汀線変動も無視できない。逆にタイプ b にあっては汀線付近にリズムミクな凹凸を有するビーチカスプがしばしば発達する<sup>7)</sup>。適切な砂浜の設計・管理には、これら類型別の海浜特性を十分把握することが必要である。類型別の砂浜管理項目を Table 2.3.1 に示す。表中の○は考慮すべき事項、×は考慮しなくてもよい事項、▲は現地特性で判断する事項である。



(a) Aug. 2006 before high waves



(b) Oct. 2006 after high waves



Photo by Takaaki Uda

**Fig. 2.3.6** Condition of gravel beach before and after high waves. <sup>2)</sup>**Table 2.3.1** Beach management points according to 2 types.

Type		a) Sandy beach (Gentle slope)	b) Gravel beach (Steep slope)
Long-term beach change		○	○
Short-term beach change	Seasonal beach change	○	▲
	Beach change by offshore sand transport under high waves	○	×
	Shoreline change due to cusp formation	○	×

### (3)計画砂浜断面の設計例

**Fig. 2.3.4** の設計フローに従って、計画砂浜断面の設計例（神奈川県茅ヶ崎中海岸）を以下に示す。

#### 1)要求性能の設定

海岸保全施設として砂浜に求める防護性能は、対象海岸の背後に主要幹線道路（国道 134 号）が位置し、さらにその背後に住居が集積することから、消波機能により波浪による背後地への海水の浸入を防止し、越波流量を許容量以下に減少させること、また、過去に既設護岸が被災したことから、根固め機能により護岸の安定性を維持することとする。一方、砂浜の安全性は、長期的な海岸侵食、短期的な海浜変形に対して適切な安定性を有し、海浜変形が生じた場合においても、防護上機能が確保されていることとする。

#### 2)防護水準の設定

防護水準は、相模灘沿岸海岸保全基本計画 <sup>8)</sup> で設定されている設計外力に対して、背後地の安全性が確保されることとする。具体的には、設計高潮位 H.H.W.L. (T.P.+1.56 m) に設計

波（1/30 確率波,  $H_o'=8.7$  m,  $T=12.6$  s）を最大とする波浪が来襲した場合の想定外力に対し、砂浜と既設護岸により背後地の安全性を確保する。この場合の防護水準は、既設護岸の天端高が T.P.+6.5 m であることから、波のうちあげ高  $R$  が T.P.6.5 m 以下、背後地の重要度から許容越波流量  $q$  は  $0.02$  m<sup>3</sup>/m/s 以下とする。また、護岸前面の浜幅が 20 m 未満であった 2005 年では、高波浪時に護岸の基部を波が洗い護岸が沈下、被災したことから、護岸の根固め機能として浜幅 20 m 以上とする。

### 3)目標とする海浜像の設定

対象海岸では、海水浴、地引網などの海岸利用のほか、サーフィン、散策など年間を通じて海岸利用がなされている。したがって、砂浜の回復にあたっては、防護だけでなくこのような利用状況を十分考慮する必要がある。具体的には、侵食被害が発生する以前の自然海浜として、比較的遠浅で、汀線から陸向きに緩勾配の砂浜があり、背後の砂丘地へとなだらかに繋がる 1970 年代の海浜が復元目標として考えられる（Fig. 2.3.7）<sup>9)</sup>。



Photo by Kanagawa prefecture

Fig. 2.3.7 Past beach condition in 1979. <sup>9)</sup>

### 4)現状海浜の評価

現状海浜の防護性能の評価は、Fig. 2.3.2 に示した 2005 年当時の海岸中央部（No.18）の海浜縦断形を対象に行う。汀線付近の勾配は 1/10、水深 1～8 m が 1/30、水深 9m 以深は侵食緩斜面が沖合に広がる。この断面に対し、まず、中村ら <sup>10)</sup>の改良仮想勾配法により、設計波（ $H_o'=8.7$  m,  $T_o=12.6$  s）を最大波とする波浪条件と設計高潮位 H.H.W.L.=T.P.+1.56 m における波のうちあげ高を算定すると、波高  $H_o'=6.7$  m,  $T=12.6$  s の時にうちあげ高が最大となり、最低限の余裕高 0.5 m を加えた値は T.P.+6.6 m で、既設護岸高 T.P.+6.5 m を越え

る．次に，越波流量を高山ら<sup>11)</sup>の算定式により計算すると，越波流量は  $q=0.04 \text{ m}^3/\text{m/s}$  となり，許容越波流量  $0.02 \text{ m}^3/\text{m/s}$  を越える．また，2005 年当時の浜幅は 15 m 程度であり，護岸基部の洗掘防止のための十分な浜幅は確保されていない．評価結果を **Table. 2.3.2** に示す．

**Table. 2.3.2** Evaluation of present beach.

評価項目	防護水準	評価結果	
波のうちあげ高 ( $R+H.H.W.L.+$ 余裕高 0.5 m)	$< T.P.+6.5 \text{ m}$	$T.P.+6.6 \text{ m}$	NG
背後地への越波流量 $q$ ( $\text{m}^3/\text{m/s}$ )	$< 0.02 \text{ m}^3/\text{m/s}$	$0.041 \text{ m}^3/\text{m/s}$	NG
護岸の根固めとして必要な浜幅 $B$ (m)	$B > 20 \text{ m}$	$B=13 \text{ m}$	NG

## 5)砂浜の断面諸元の検討

防護上必要な砂浜の断面諸元を設定する．対象海岸のバーム高は  $T.P.+3 \text{ m}$ ，前浜勾配は 1/10 なので，最少断面での浜幅は 30 m となる．この断面に対する波のうちあげ高は  $T.P.+6.52\text{m}$  となり，既設護岸高  $T.P.+6.5\text{m}$  をわずかに上回る．一方，越波流量は  $q=0.016 \text{ m}^3/\text{m/s}$  となり，許容越波流量  $0.02 \text{ m}^3/\text{m/s}$  を満足する．また，浜幅は 30m なので，根固め機能を確保するための必要浜幅 (20m 以上) も満足する．ここで，砂浜は，長期的な侵食や短期的な海浜変形に対して適切な安定性を有し，海浜変形が生じた場合においても，防護上必要な浜幅が確保されていなければならない．この場合，長期的な侵食 (不可逆的な海浜変形) は継続的な養浜により対応し，高波浪時の短期的な侵食 (可逆的な海浜変形) のみ考慮し，短期的な汀線後退量を 10 m とすると，浜幅 40 m となる．この断面に対する波のうちあげ高は，既設護岸高以下の  $T.P.+6.4 \text{ m}$  となり，防護性能を満足する．浜幅 40m の断面に対する評価結果を **Table. 2.3.3** に示す．

**Table. 2.3.3** Evaluation of planned beach.

評価項目	防護水準	評価結果	
波のうちあげ高 ( $R+H.H.W.L.+$ 余裕高 0.5 m)	$< T.P.+6.5 \text{ m}$	$T.P.+6.4 \text{ m}$	OK
背後地への越波流量 $q$ ( $\text{m}^3/\text{m/s}$ )	$< 0.02 \text{ m}^3/\text{m/s}$	$0.016 \text{ m}^3/\text{m/s}$	OK
護岸の根固めとして必要な浜幅 $B$ (m)	$B > 20 \text{ m}$	$B=40 \text{ m}$	OK

## 6)計画砂浜断面の決定

最少断面の波のうちあげ高は計画護岸高を 0.02m 上回るが，余裕高 0.5m 内で調整するものとして，防護上必要な浜幅  $B^*$  は 30 m とする．したがって，計画海浜断面は最少断面に変動幅 10m を加えた 40m となる (**Fig. 2.3.8**)．なお，この諸元を基本に，利用に配慮して 1970 年代の海浜が復元目標となる．

$$\text{計画浜幅 } B = B^* + \Delta Y_1 + \Delta Y_2 = 30 \text{ m} + 0 \text{ m} + 10 \text{ m} = 40 \text{ m}$$

$B^*$  : 防護上必要な浜幅

$\Delta Y_1$  : 長期的な汀線後退量 (維持養浜により対応するため考慮しない)

$\Delta Y_2$  : 短期的な汀線後退量 (高波浪時の地形変化の実態より 10 m)

後浜高 T.P.+3.0 m (現地バーム高)

前浜勾配 1/10 (現地前浜勾配)



**Fig. 2.3.8** Example of planned shoreline and beach width.

## 2.4. 砂浜の施工

施工において、砂浜の計画断面を出来形管理することは、常時波が作用する状況下では技術的に困難である。より効率的な施工を行うためにも、養浜投入後は来襲波浪による自然な形状変化に期待すればよい。したがって、施工段階では **Fig. 2.4.1** ように設計と同様の後浜高  $h_{BS}$  で、沖側勾配は重機で土砂を巻き出したときの状態として、設計と同様の養浜量を投入するための養浜幅  $b$  を設定すればよい。したがって、砂浜の設計、すなわち養浜設計においては **Fig. 2.3.4** に示した機能照査のための断面と、**Fig. 2.4.1** に示す施工断面の検討が必要となる。

一方、養浜形状や海浜の安定性は養浜材の粒径に大きく依存するので、適切な方法により養浜材を評価し、所要の安定性を確保することが重要である。特に、細粒分が多く含まれる養浜材では、多くの場合、養浜材が沖向きに移動して安定に達することがないという結果となる。養浜材の評価方法としては、「実務者のための養浜マニュアル」<sup>1)</sup> に示したように粒径を考慮した等深線変化モデル<sup>12)</sup> の数値計算による方法がある。一方、前述したように沖合も含めて海浜を保全するには、細粒分の供給を考慮する必要がある、最適な養浜材は現地底質と同程度となる。この養浜材の歩留まりと割増し率については、対象海岸の現状の底質と養浜材の粒径加積曲線から判断できる。例えば、対象海岸の底質条件から、沖合の緩傾斜を成す細砂  $0.075\sim 0.25\text{mm}$  が必要で、かつ  $0.25\text{mm}$  以上が汀線前進に効果的であるとした場合、**Fig. 2.4.2** に示すように現状の底質より細粒分を多く含む養浜材 A では汀線前進が望めない。シルト粘土分が 23% を占める養浜材 B は、海岸保全には 80% 程度しか寄与しないが、 $0.25\text{mm}$  以上の粒径が 50% を占めるので、投入土砂の 50% 程度は汀線前進に寄与する。汀線前進のみを主目的にする場合は、投入量に見合う汀線前進量は期待値の半分程度と考えてよいので、この土砂を養浜に用いる場合は計画量の 2 倍の養浜材が必要となる。一方、養浜材 C のように、粗粒材を多く含む場合は、前浜の拡幅には効果的であるが、遠浅の海岸に戻すために必要な細砂  $0.075\sim 0.25\text{mm}$  をほとんど含まないため、外浜の保全には効果的ではない。このように、養浜の実施にあたっては、現地底質の粒径加積曲線を指標として、使用する養浜材を評価すれば良い。

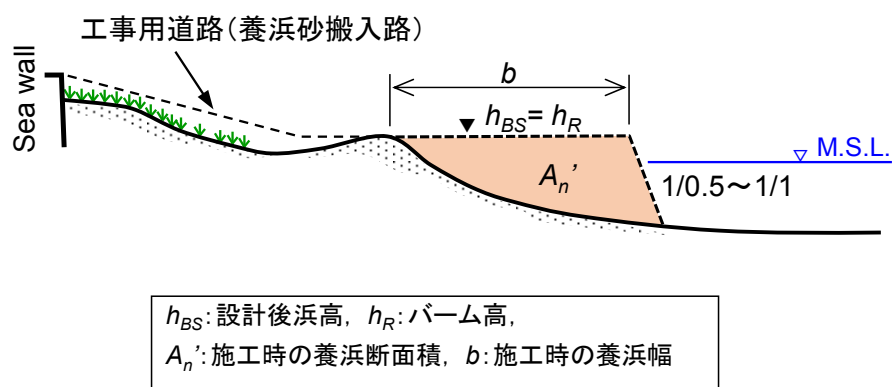


Fig. 2.4.1 Planned beach profile for construction.<sup>2)</sup>

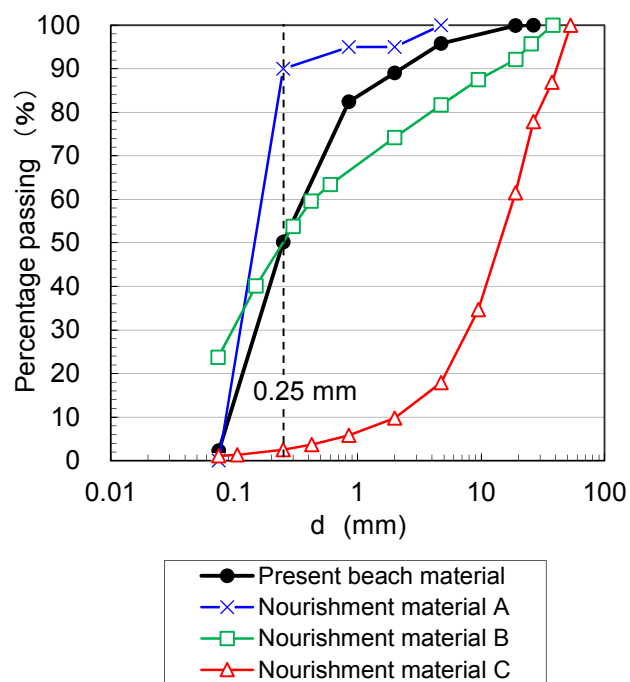


Fig. 2.4.2 Comparison of present beach material with Nourishment material.<sup>2)</sup>



## 2.5. 砂浜の管理

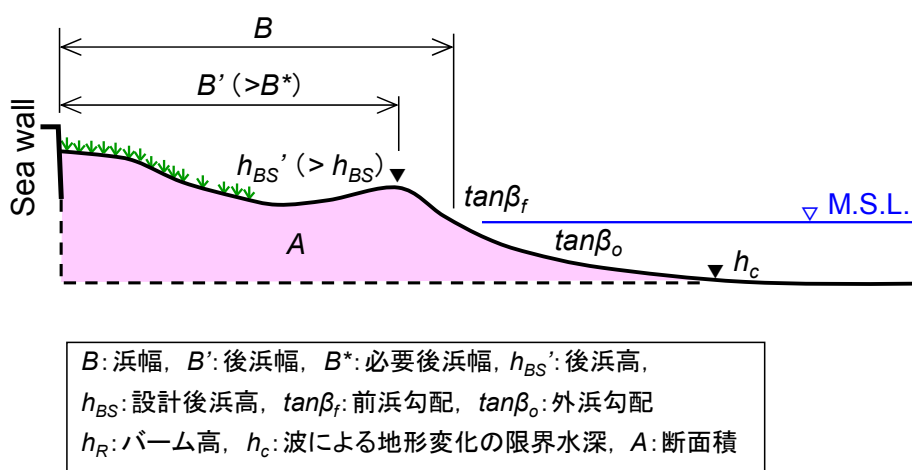
海岸保全施設として指定された砂浜を適切に管理するには、他の海岸保全施設と同様、防護など要求性能が維持されているかを確認する必要があるが、従来の保全施設は基本的に被災しない限り機能が維持されるのに対し、砂浜は砂が絶えず動きながら形状が維持されていることに特徴がある。砂の自由な移動を許すことが海浜にとって自然らしさを保つ上で本質的に重要であることから、自由な変動を許容しつつも海岸保全上問題が起こらないよう、時間・空間的にある程度の変動の枠の中で管理を行うこととなる。したがって、絶えず変形を繰り返している砂浜を適切に管理するには、これまで以上に漂砂特性を理解し、判断する能力が要求される。また海岸侵食のメカニズムを十分理解することが必要とされる。例えば、管理水準を割ったことで、直ちに災害とはいいきれず、そのためには現地海岸の特性を十分把握する必要がある。また海岸保全施設としての砂浜海岸を管理するには、防災機能を保持することが重要であると同時に、必要に応じて利用および環境上の要請に応えることも重要である。

管理水準については、日常的に変動する砂浜の特性から、**Fig. 2.5.1** に示すように、設計諸元より「越波を許さない」「堤防・護岸が洗掘を受けない」などの要求を満たす最低条件を定める断面諸元と、これによる断面積とすればよいと考える。なお、管理水準は土砂動態の変化や保全事業の実施等の管理行為によって変化するので、状況の変化とともに目標値も変動することに留意する必要がある。管理においては、定期的な横断測量や深浅測量などに加えて、砂浜は外力条件に大きく影響を受けるため、高波浪来襲後などの日常的な確認も必要である。しかしながら、外浜勾配や  $h_c$  など水面下の情報をそのたびごとに把握することは困難であるので、日常的な管理では、汀線より陸側の断面諸元を簡易に計測し、管理水準を満足しているか否かを確認するとともに、侵食が生じている場合は、その状況が異常かつ不可逆的な変化か否かを判断する。この場合、現地では次の点を確認し、総合的に判断すれば良い<sup>7)</sup>。

- ・ 浜幅は、測量時期の異なる同位置の海浜縦断形の重ね合わせなどから判断した短期変動幅内であるか。
- ・ 高波浪後の浜崖の沿岸方向の比高分布と、これにより推定される漂砂方向の確認。一般に比高が減少する方向は沿岸漂砂の方向を示している。場所的に一様な現象として観察されれば現象は岸沖漂砂起源のことが多い。
- ・ バームの沿岸方向の分布の確認。沿岸方向に一様であれば岸沖変動が主要因と判断できる。つまり、静穏時に砂浜の回復が見込まれる。
- ・ 底質が極端に粗粒化していないか。
- ・ 高波浪時の外力条件はどの程度であったか。異常気象ではないか。

また、浜幅が広い場合、飛砂により内陸へと細砂が選択的に運ばれることも管理上注意が必要である。

以上のように、砂浜を適切に管理するための基本的な考え方について、新しい知見をふまえて整理・提案したが、適切な管理を実施するためには、一連の漂砂系の土砂動態を粒径も考慮して十分把握し、管理することが重要である。これについては **3 章** で述べる。



**Fig. 2.5.1** Principal check point for maintaining sandy beach. <sup>2)</sup>



## 2.6. 結言

2章では、「砂浜（養浜）」に関する計画，設計，施工，管理の基本的な考え方や方法を，最新の知見をふまえて整理した．砂浜が海岸保全施設として位置付けられ，各地で養浜が行われているが，この場合，砂浜の季節変化やひと時化の高波浪時に生じる短期的な変動が，海岸管理上重要になる．適切に砂浜を管理するためには，現地海岸の特性を十分把握することが最重要であり，これには既存資料や測量結果からの理解に加えて，積極的に数多く現地海岸に赴き，海岸を診る経験を積み重ねることが最も理解が促進される．

## 参考文献

- 1) 宇多高明・石川仁憲:「実務者のための養浜マニュアル」, (財) 土木研究センター, p. 170, 2006.
- 2) 宇多高明・石川仁憲・福濱方哉・山田浩次: 海岸保全施設としての「砂浜」の考え方, 海洋開発論文集, 第 23 巻, pp.1027-1032, 2007.
- 3) 土木学会海岸工学委員会ほか:「海岸保全施設設計便覧」, (社) 土木学会, p. 582, 2000.
- 4) 石井秀雄・中村友和・宇多高明・高橋 功・大木康弘・熊田貴之: 粗粒材養浜による砂浜の安定化に関する現地実験, 海岸工学論文集, 第 53 巻, pp. 681-685, 2006.
- 5) 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: 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, 2006.
- 6) 野志保仁・小林昭男・宇多高明・芹沢真澄・熊田貴之: 局所勾配算定式の適用範囲と底質特性の新しい評価指標, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp. 406-410, 2005.
- 7) 宇多高明:「海岸侵食の実態と解決策」, 山海堂, p.304, 2004.
- 8) 神奈川県:「相模灘沿岸海岸保全基本計画」, 2004.
- 9) Ishikawa, T., T. Uda, G. Aoshima and A. Yoshioka. 2009. Deducing past coastal conditions using old photographs and creation of predicted image of coast, Asian and Pacific Coasts 2009, Proc. 5th International Conf., Vol. 2, pp. 83-89.
- 10) 中村 充・佐々木泰雄・山田譲二: 複合断面における波の打ち上げ高に関する研究, 第 19 回海岸工学講演会論文集, pp.309-312, 1973.
- 11) 高山知司・永井紀彦・西田一彦: 各種消波工による越波流量の減少効果, 港湾技術研究所報告, 第 21 巻, 第 2 号, pp. 151-205.
- 12) 熊田貴之・小林昭男・宇多高明・芹沢真澄・野志保仁: 粒度組成の三次元変化を考慮した等深線変化, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp. 441-445, 2004.

### 3. 砂浜による海岸保全を図るための土砂管理手法

#### 3.1. 緒言

海岸侵食は、地盤沈下や地殻変動に伴う陸地の沈降、海面上昇を除くと、一連の漂砂系の中で、河川や海食崖などからの供給土砂量の減少、防波堤や導流堤等による沿岸漂砂の遮断、波の遮蔽域の形成、さらには海砂採取といった人為的な要因によって生じる。また、海底谷を経由した深海への土砂流出や、多くの海岸でみられる飛砂による陸域への流失は、供給土砂の減少や沿岸漂砂の連続性が断たれた場合にはこれらの土砂損失は深刻な問題となる。このような海岸侵食に対して、従来、離岸堤や消波堤等の構造物により侵食対策が図られてきた。しかしながら、一方向沿岸漂砂が卓越する海岸では、構造物により侵食速度は軽減したとしても、時間の経過とともに侵食域が構造物の下手側へと次々と広がっていき、問題解決を先送りするのみで、抜本的な対策にはなっていない。したがって、侵食域の広がりを防ぎ、自然海浜をできる限り良好に保つには、継続的な動的養浜を実施し、砂浜による海岸保全を図っていく以外の方法はない。この場合、動的養浜は、維持管理を適切に継続することで機能維持を図るものであり、これを含めて公共事業としての永続性が確保される。また、多くの場合、将来にわたって継続する必要があることから、安価で長期的に安定した養浜材の供給が可能でなければならない。そのためには、投入した養浜材も含めて、海岸の限られた砂を有効活用し、一連の漂砂系において適切な土砂管理により砂浜を維持することが経済的にも優れる。

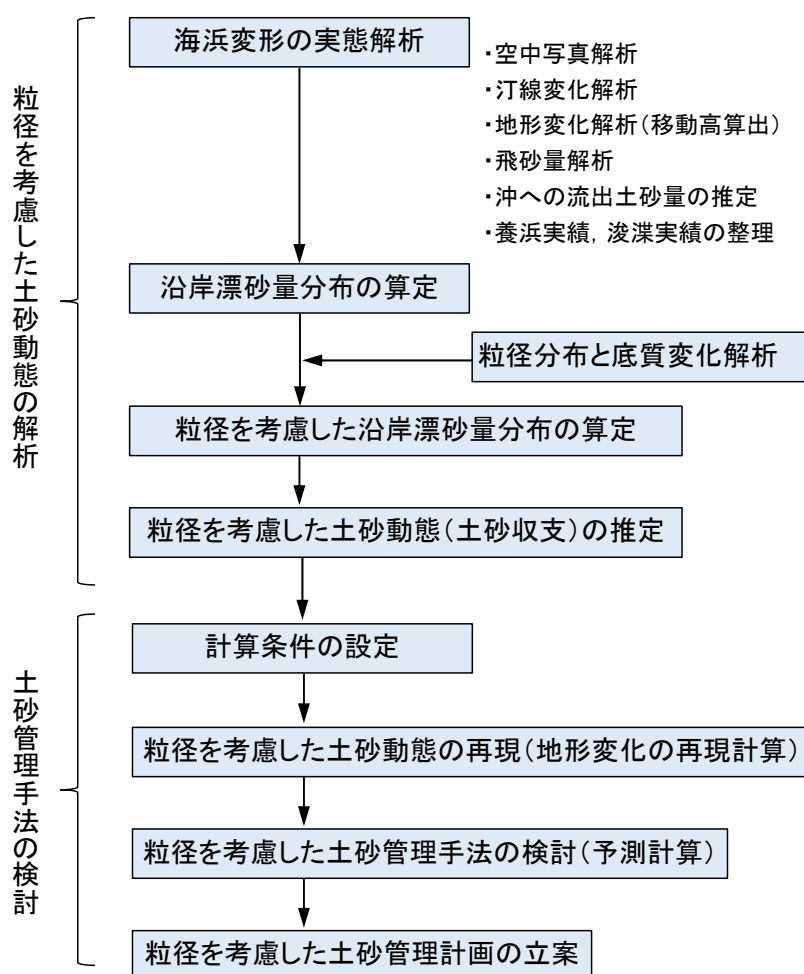
適切な土砂管理を行うには、一連の漂砂系の海岸特性（堆積、侵食、安定傾向）を調べ、土砂動態を明らかにする必要がある。その上で、効果的かつ経済的な手法で継続的に動的養浜を行う管理計画を検討する。この場合、海岸では侵食・堆積状況に依存して場所ごとに粒径が異なり、粒径により土砂動態が異なることから、土砂量についての議論のみでは不十分であり、質までも考慮した土砂管理計画を立案する必要がある。

**3章**では、砂浜による海岸保全を図るための、安定的な養浜材の確保とより経済的な手法として、海岸の限られた砂を有効活用し、一連の流砂系における質（粒径）までも考慮した土砂管理手法を提案した。さらに、神奈川県湘南海岸を例に、粒径を考慮した土砂動態の解析方法と土砂管理手法の検討方法を取りまとめた。

#### 3.2. 粒径を考慮した土砂管理手法の考え方と検討方法

先に述べたように、適切な土砂管理を行うには、一連の漂砂系の海岸特性を調べ、粒径を考慮した土砂動態を明らかにする必要がある。その上で、効果的かつ経済的に動的養浜を継続する土砂管理手法を検討する。ここで、細砂や中砂は、波の作用で広く拡散し、沖へ流出しやすく、侵食域の前浜の保全には効果的でないが、沖合も含む海岸全域の保全を図ることがで

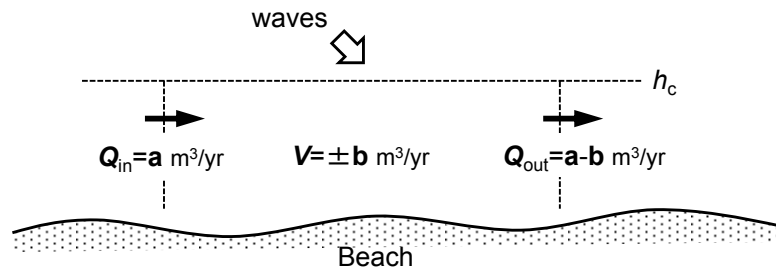
きる。一方、粗砂や礫などの大きい粒径は、安定性が高く、前浜の拡幅に効果的である。このような粒径別の保全効果や移動特性を十分考慮した土砂管理を行うことで、より海岸保全に効果的で経済的な管理を行うことができると考える。検討方法を **Fig. 3.2.2** に示す。対象海岸の土砂動態は、空中写真や深浅測量データ、底質データなどのモニタリングデータを解析することで、明らかにする。一方、土砂管理手法については、対象海岸の土砂動態を再現した地形変化予測モデルにより検討を行う。



**Fig. 3.2.2** Study procedure for comprehensive management of sand.

本研究では、**Fig. 3.2.3** に示すように、対象海岸の粒径を考慮した土砂動態の解析を行うことが新しいが、この方法は次の考えに基づく。一般に、海岸の底質は砂と礫で構成され、侵食海岸では、土砂供給源である河口に近づくほど、礫など粗粒の含有率が高く、一方、沿岸漂砂下手側の堆積域では細砂など細粒の含有率が高い。堆積域では底質の堆積状況が沿岸漂砂の履歴を表わすことから、**Fig. 3.2.4 (a)**に示すように 2 時期の粒度組成が同程度であれば、その間では堆積土砂とほぼ同程度の粒度組成の土砂が沿岸漂砂により供給されたと仮定できる。

(a) General method of sand budget analysis



(b) New method of sand budget analysis

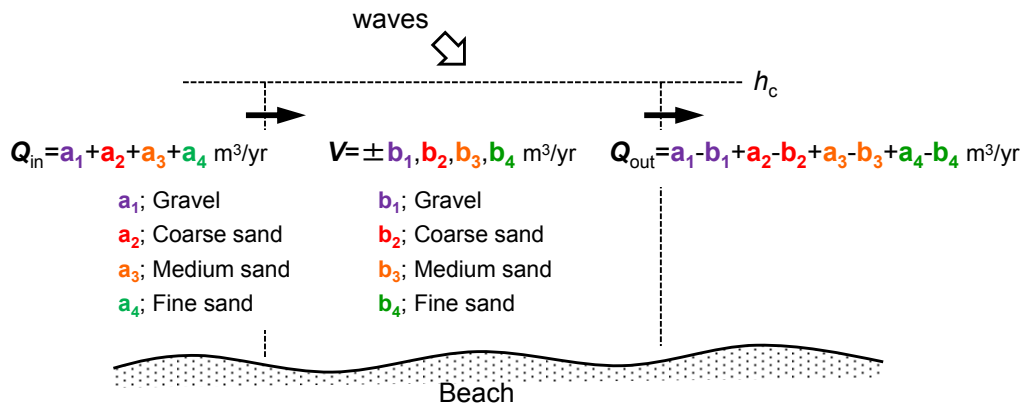
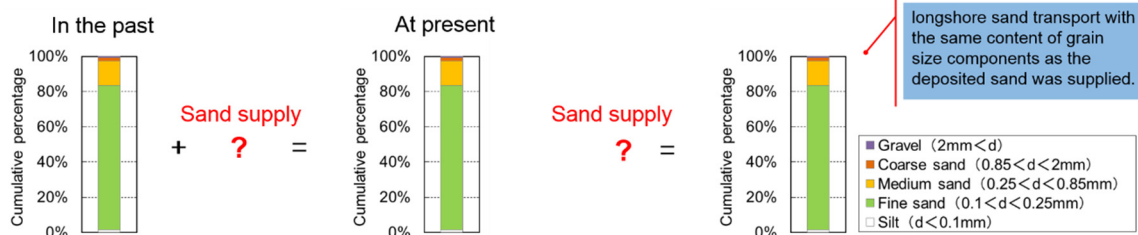


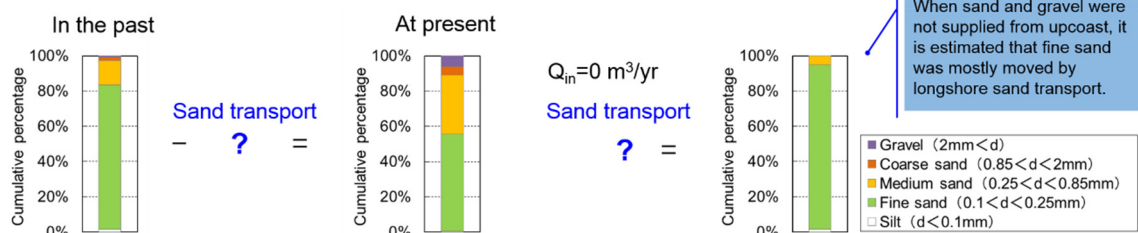
Fig. 3.2.3 New method of sand budget analysis considering grain size.

一方、侵食域では、沿岸漂砂によって砂が持ち去られると粗粒分が残される。上手側からの土砂供給がほぼゼロの場合は、侵食域での底質変化から **Fig. 3.2.4 (b)**に示すように主に細粒分が沿岸漂砂によって運ばれたと推定できるが、運ばれた土砂の含有率までは明らかにすることができない。しかしながら、多くの侵食海岸では、侵食対策として突堤などの漂砂制御施設が設置されているので、施設直上手側の底質特性より、侵食海岸から下手側の海岸へ運ばれる土砂の含有率を仮定することが可能である。具体的には **Fig. 3.2.4 (c)**に示すように突堤の先端水深と波による地形変化の限界水深間に分布する底質が沿岸漂砂により運ばれると仮定できる。次に、粒径は水深方向に大きく変わるものの、沿岸方向にはほぼ一様に分布するという特徴より、沿岸方向に適当な間隔で設定された測線間の底質データを補間すれば、沿岸漂砂によって運ばれる粒度組成の沿岸方向分布を求めることができる。その上で、養浜等の要因を補正した年間単位幅当たりの地形変化量に、粒度組成から求めた各地点の粒径別の含有率をそれぞれ乗じ、さらに漂砂下手端で  $Q=0 \text{ m}^3/\text{yr}$  として粒径毎に漂砂上手方向に積分すれば、それぞれの粒径ごとの沿岸漂砂量分布を算出しすることができる。

(a) Accretion area



(b) Erosion area



(c) Around Groin

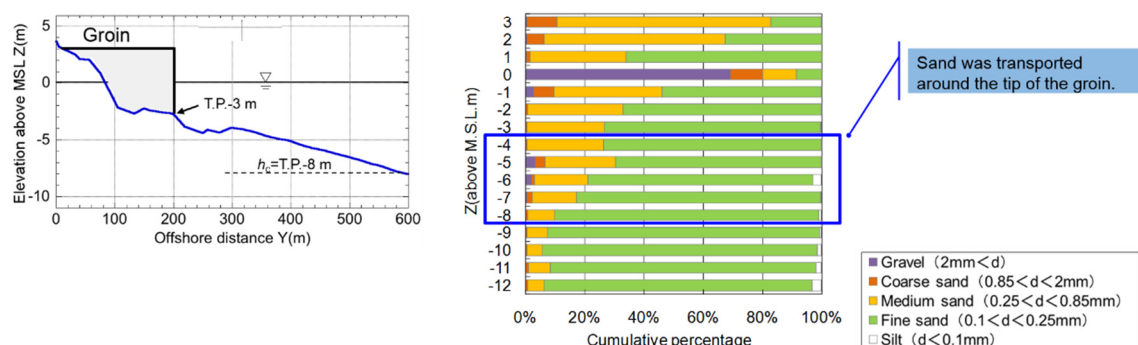
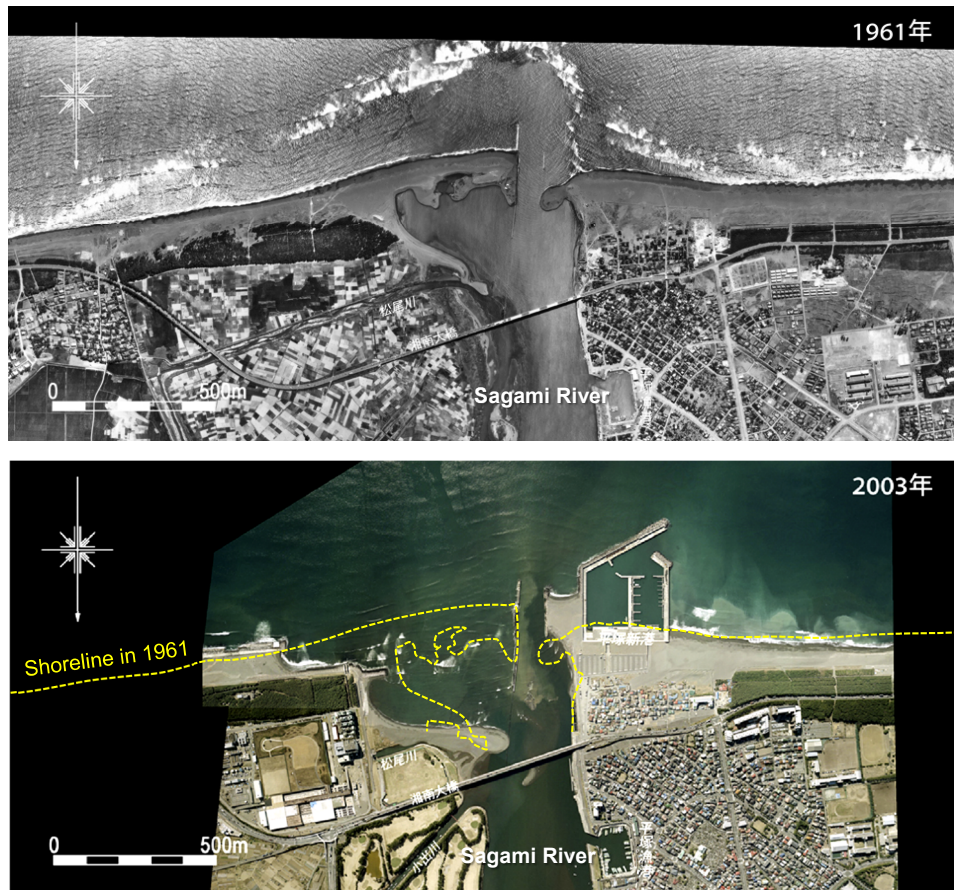


Fig. 3.2.4 Concept of estimate sand supply in accretion zone.

ここで、本研究で提案する土砂管理は、漂砂系内の土砂管理で砂浜の保全・維持ができない場合は、ダムや河床の堆砂を浚渫して海岸に運ぶサンドバイパスを行い、流砂系の土砂の有効活用を図るものとする。河川流出土砂量が激減により侵食が進む海岸において、将来的に海岸保全を確実に進めるためには、流域総合土砂管理の考え方のもと、川と海岸を一体的に捉え、激減した河川流出土砂量の回復を図ることが必要である。しかし、仮に河川流出土砂量が過去と同程度まで回復したとしても、河口テラスが復元しなければ、海岸へ土砂が供給されることはない。例えば、神奈川県湘南海岸の土砂供給源である相模川は、流域面積 1,680 km<sup>2</sup>、幹川流路延長 109 km の一級河川であるが、Fig. 3.2.5 に示すように、相模川上流部でのダム建設、河道での大規模な砂利採取、河口での航路浚渫などにより河川流出土砂量が激減した結果、河口テラスが縮小し、河口部汀線が最大約 150m 後退した。この状態で、仮に自然状態での流出土砂量  $1.5 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{yr}$  が流れたとしても、河口テラスの復元には 20～30

年を要する<sup>1)</sup>。このようなことから、漂砂系外からの海岸への土砂供給は、流砂系（河川やダム）の堆砂をサンドバイパスによって人為的に海岸へ運ぶしか方法がない。



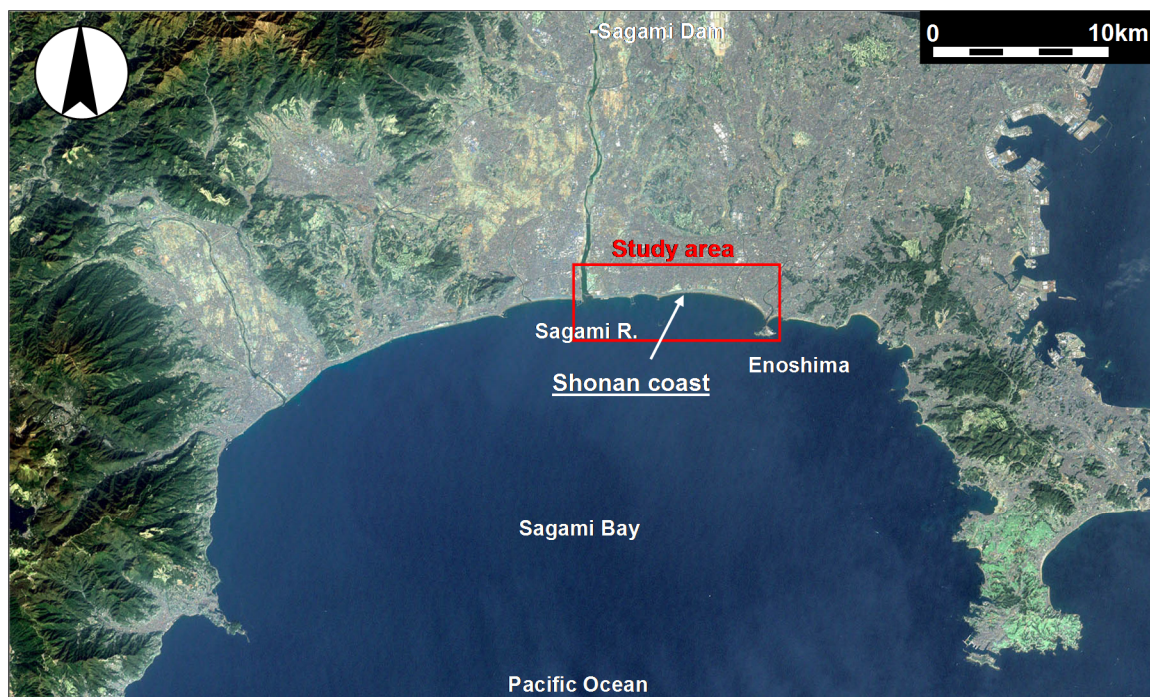
**Fig. 3.2.5** Aerial photographs of Sagami river mouth.in 1961 and 2003. <sup>1)</sup>



### 3.3. 粒径を考慮した土砂動態の解析（湘南海岸の例）

相模湾に面し、相模川河口から江ノ島の間広がる延長 11km の湘南海岸（**Fig. 3.3.1**）を対象に、**Fig. 3.2.2** の検討フローに従って、粒径を考慮した土砂動態の解析例<sup>2)3)</sup>を以下に示す。

湘南海岸は、相模川上流でのダム建設や過去に相模川の河道において行われた砂利採取により河川流出土砂量が大きく減少するとともに、相模川河口などでの航路浚渫、さらに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。このような湘南海岸における海岸侵食に関連し、1954～2005 年の海浜変形について既に宇多ら<sup>4)</sup>によって検討されたが、その検討では移動高の算定など不明確な部分が残されているとともに、漂砂系全体の土砂収支は明らかにされていない。一方、相模川水系土砂管理懇談会<sup>5)</sup>によれば、相模川の流出土砂量はダム建設前の 15 万  $\text{m}^3/\text{yr}$  より現在の 0.5 万  $\text{m}^3/\text{yr}$  と約 3%にまで激減しているとされる。このように河川からの土砂供給が期待できない状況の中で、経済的かつ長期的に海岸を維持するには、限りある資源である海岸の砂を有効活用する必要がある。この場合、海岸の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、粒径についても十分配慮した土砂管理が求められる。



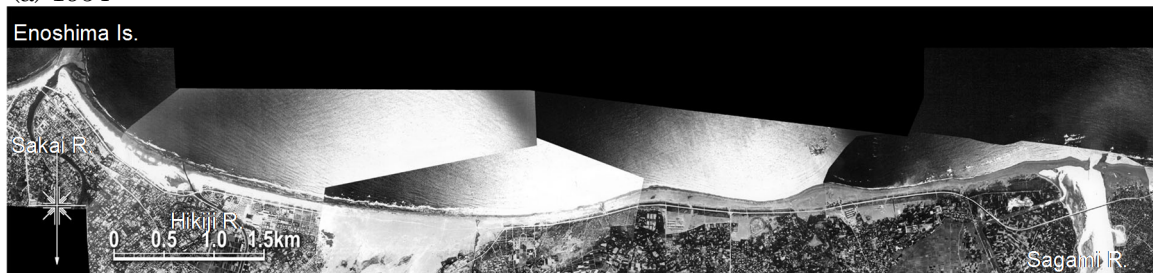
Source: Landsat.org, Global Observatory for Ecosystem Services, Michigan State University (<http://landsat.org>), 2000-2001

**Fig. 3.3.1** Location of study area (Shonan coast) in Sagami Bay.

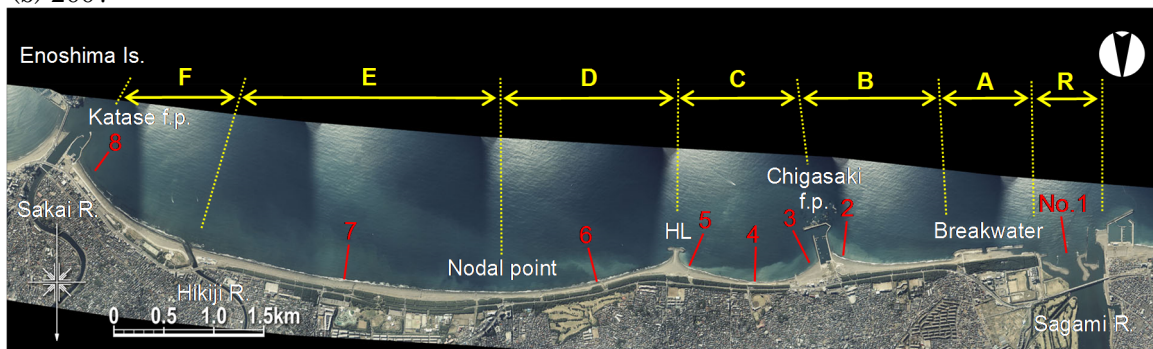
### (1)近年の海浜変形の実態と沿岸漂砂量

湘南海岸における近年の海浜変形の実態と沿岸漂砂量を明らかにするため、ヘッドランド建設後の1996～2007年の11年間を対象に土砂動態を解析する。まず、**Fig. 3.3.2**に示すように、偏歪修正を行った1996, 2005, および2007年の空中写真より汀線を判読し、写真撮影時刻と縦断測量に基づく前浜勾配から潮位補正を行って平均潮位対応の汀線位置を求める。さらに1954年と1996年の汀線を基準として各年の汀線変化量を算出する。結果を**Fig. 3.3.3**, **3.3.4**に示す。2007年11月21日の撮影前には、台風9号(9月6日襲来)による30年確率規模の高波浪が来襲したが、2時期の汀線には大きな変化は見られない。また、相模川からの供給土砂の激減や茅ヶ崎漁港による漂砂の遮断など沿岸漂砂の不均衡により施設周辺では局所的な変化が生じ、各施設間では、海岸線が時計回りに回転するような汀線変化傾向が見られる。

(a) 1954



(b) 2007



**Fig. 3.3.2** Aerial photographs in 1954 and 2007, arrangement of blocks A, B, C, D, E, F and R, and location of transects No.1 through No. 8. <sup>3)</sup>



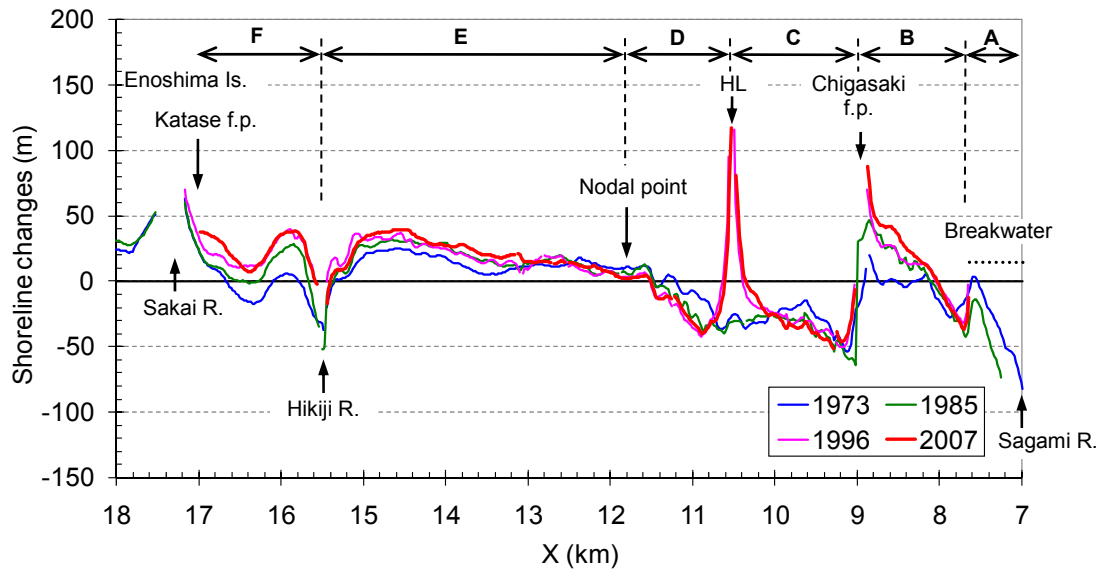
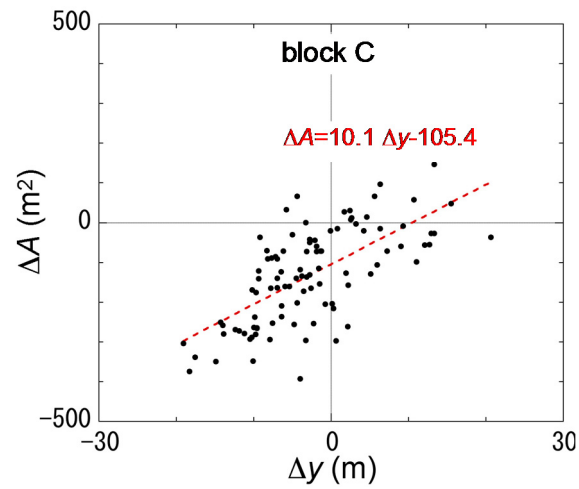


Fig. 3.3.3 Shoreline changes between 1954 and 2007. <sup>3)</sup>

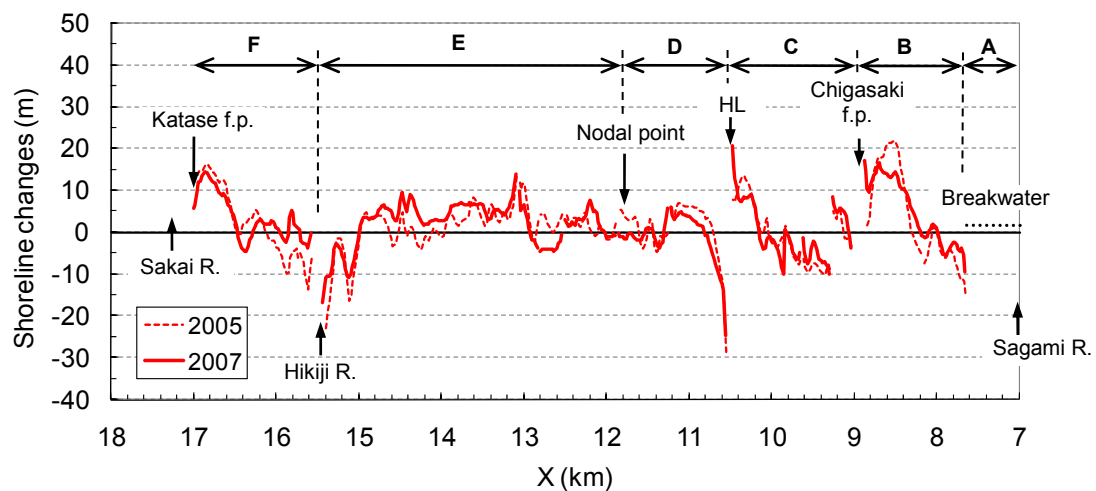
次に、1971 年以降毎年行われている定期深浅測量データ（1971～2005 年の 35 年間）より、1971 年を基準とした各年の汀線変化量 ( $\Delta y$ ) と海浜断面積変化量 ( $\Delta A$ ) を求め、両者の相関から漂砂の移動高を算出する。まず対象海岸の構造物条件と漂砂特性を考慮し、対象区域を **Fig. 3.3.2** に示したように 7 ブロックに区分し、各ブロックの漂砂の移動高を算出する。各ブロックは構造物や小河川を考慮して設定する。具体的には、R ブロックは相模川河口域、A ブロックは河口左岸から柳島消波堤、B ブロックは柳島消波堤から茅ヶ崎漁港、C ブロックは茅ヶ崎漁港からヘッドランド、D ブロックはヘッドランドから 3 号放水路、E ブロックは 3 号放水路から引地川、F ブロックは引地川から境川とする。ここで、断測量結果によれば、引地川から境川区間 (No.19～No.22) での波による地形変化の限界水深  $h_c$  は  $-8$  m、引地川以西での  $h_c$  はほぼ  $-9$  m 付近にあること、また陸上部の  $+3$  m 以上では人為改変がたびたび行われていることを考慮し、海浜断面積を求める際の積分範囲は T.P.  $+3.0 \sim -9.0$  m とする。一例として **Fig. 3.3.2** に示す茅ヶ崎漁港とヘッドランド間の茅ヶ崎中海岸 (C ブロック) での検討結果を **Fig. 3.3.4** に示す。  $\Delta y$  と  $\Delta A$  の間にはほぼ線形な関係がある。両変数間の回帰係数は漂砂の移動高 ( $h$ ) に等しいので  $h=10$  m となる。ブロックにおける漂砂の移動高を **Table 3.3.1** に示す。漂砂の移動高は、相模川から中海岸までは  $10$  m 程度であるが、中海岸以東では江ノ島に近づくにつれて移動高が小さくなり、 $h_c$  が  $-8$  m にある引地川以東では、江ノ島による波の遮蔽域に入るため  $6.4$  m と小さくなる。また、辻堂海岸の No.14-2～No.18 では  $5.1$  m と最も小さい値を示すが、この区間は堆積域であって、汀線前進は見られるものの断面積変化量が小さく誤差が入りやすいことから、この区間の移動高についてはその両側のブロックにおける移動高より内挿する。



**Fig. 3.3.5** Relationship between shoreline change  $\Delta y$  and change in cross-sectional area of the beach  $\Delta A$ .<sup>3)</sup>

**Table 3.3.1** Characteristic height of beach changes in blocks B, C, D, E and F.

blocks	$h$ (m)	Selected $h$ (m)
B	10.7	10
C	10.1	10
D	8.7	9
E	5.1	8
F	6.4	6.5

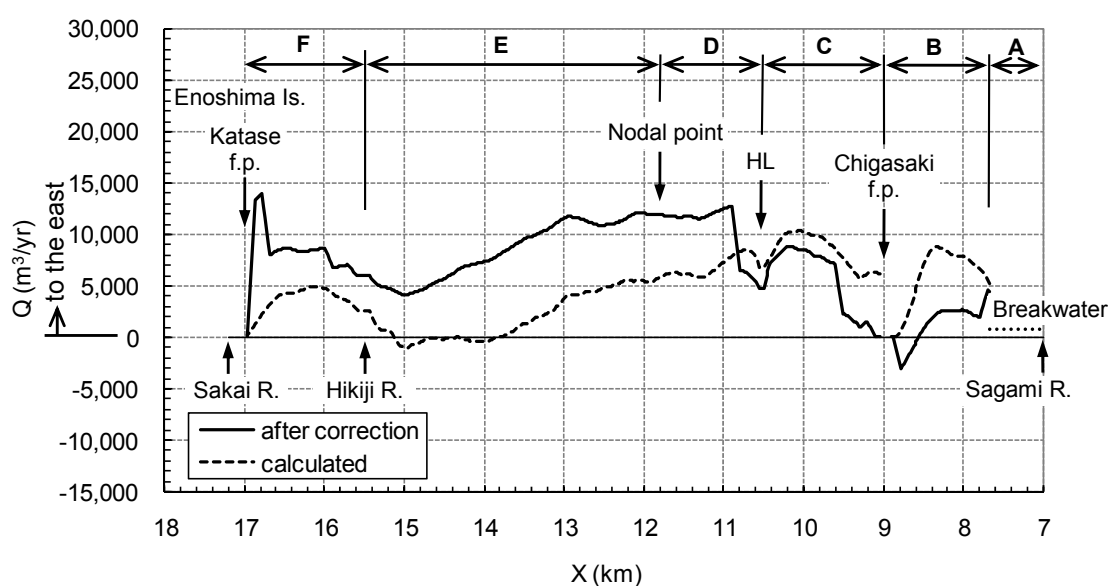


**Fig. 3.3.4** Recent shoreline changes with reference to that in 1996.<sup>3)</sup>

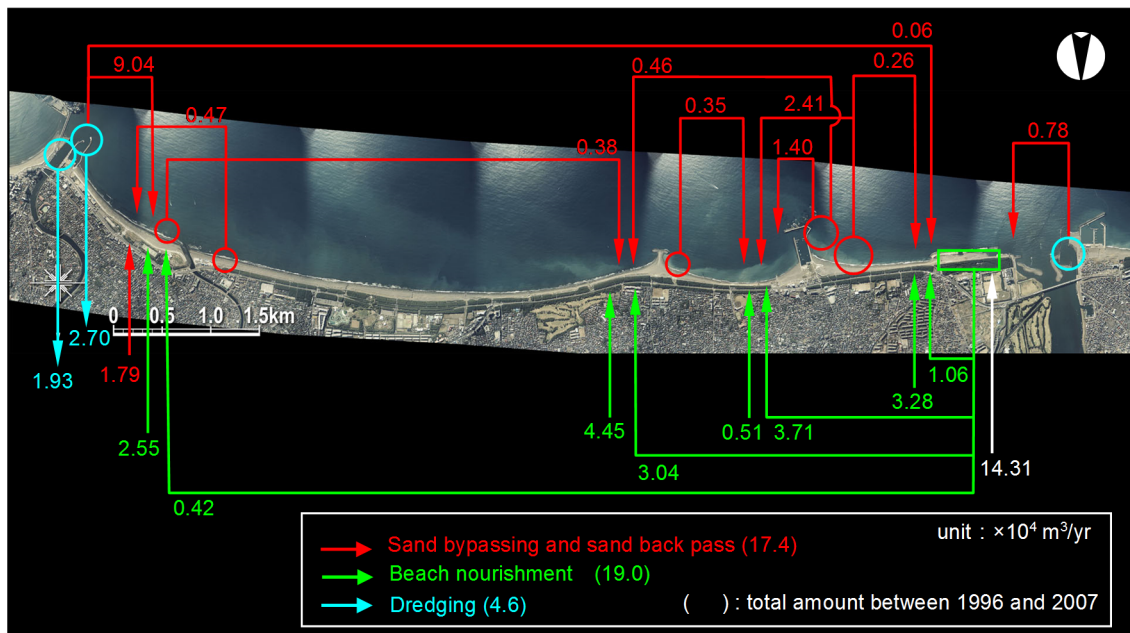
**Fig. 3.3.4** の 1996～2007 年の汀線変化量に **Table 3.3.1** の漂砂の移動高を乗じ、経過年数 (11 年) で割れば年間当たりの地形変化量が算出される。その上で、漂砂下手端 (境川) で

$Q=0$  として漂砂上手方向に地形変化量を加算して算出した沿岸漂砂量分布を **Fig. 3.3.6** の破線で示す。これによれば沿岸漂砂をほぼ完全に阻止している茅ヶ崎漁港の下手端で年間約 8000 m<sup>3</sup> 収支が合わない。このように土砂収支が合わない理由としては、人為的行為が関係する。具体的には、解析期間中は、**Fig. 3.3.7** に示すように養浜、堆積域から侵食域へサンドリサイクル・サンドバイパス、漁港での浚渫が行われているので、これら要因を取り除く必要がある。この場合、海岸域の砂を活用している養浜（サンドリサイクル、サンドバイパス）については養浜材の歩留まりを 100 % とし、浚渫土砂の利用や漂砂系外からの養浜については細粒分を多く含むことを考慮して歩留まり率を補正することで土砂収支を合わせる。これらの影響を除いて算出した結果が **Fig. 3.3.6** の実線である。なお、この場合の歩留まり率は、1996～2005 年では 66 %、相模ダムから運んだ粗い粒径を多く含む養浜材が用いられた 2005～2007 年では 83 % となる。**Fig. 3.3.6** より、沿岸漂砂量の最大値は X=11～13 km 区間で 1.2 万 m<sup>3</sup>/yr、ヘッドランド (X=10.5 km) を下手側に越える漂砂量は 0.5 万 m<sup>3</sup>/yr、一方、柳島消波堤西側 (X=7.6 km) より流入する漂砂量は 0.46 万 m<sup>3</sup>/yr となる。

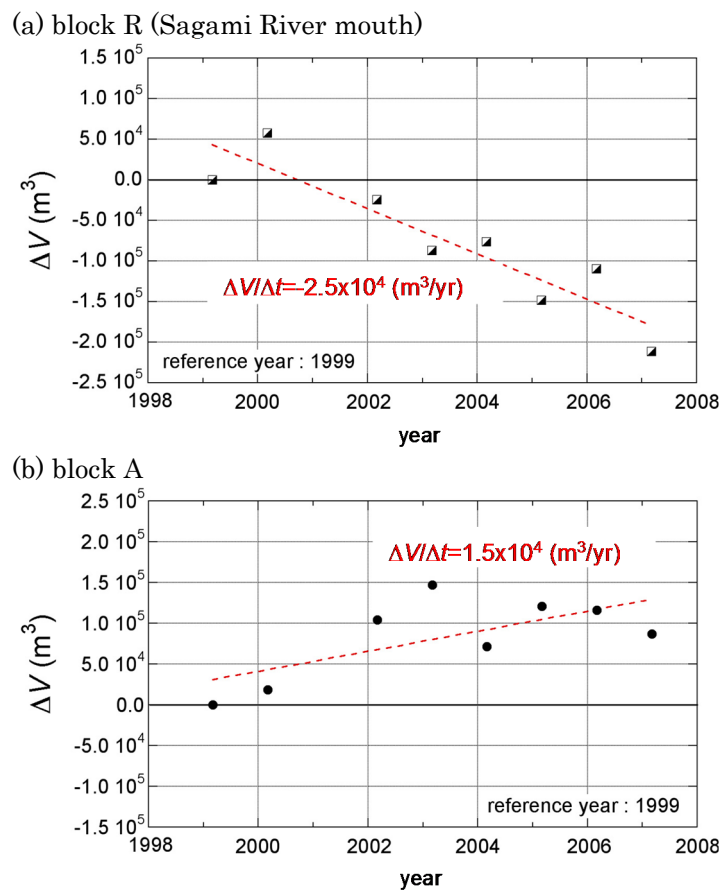
一方、汀線変化量が分からない場合は、深浅測量データの分析により算出する。対象海岸では、相模川河口域や柳島消波堤区間が該当し、この区域での土砂動態については、1999～2007 年に実施されたナローマルチビーム測量による 5m メッシュ水深データを用いて、水深変化量の平面分布を算出し、**Fig. 3.3.8** に示すように 1999 年を基準とした土砂量の経年変化から 1 年あたりの水深変化量を求める。この結果、柳島消波堤区間では -2.5 万 m<sup>3</sup>/yr、相模川河口域では 1.5 万 m<sup>3</sup>/yr の変化割合となる。



**Fig. 3.3.6** Distribution of longshore sand transport estimated from bathymetric survey data taken in 1996 and 2007. <sup>3)</sup>



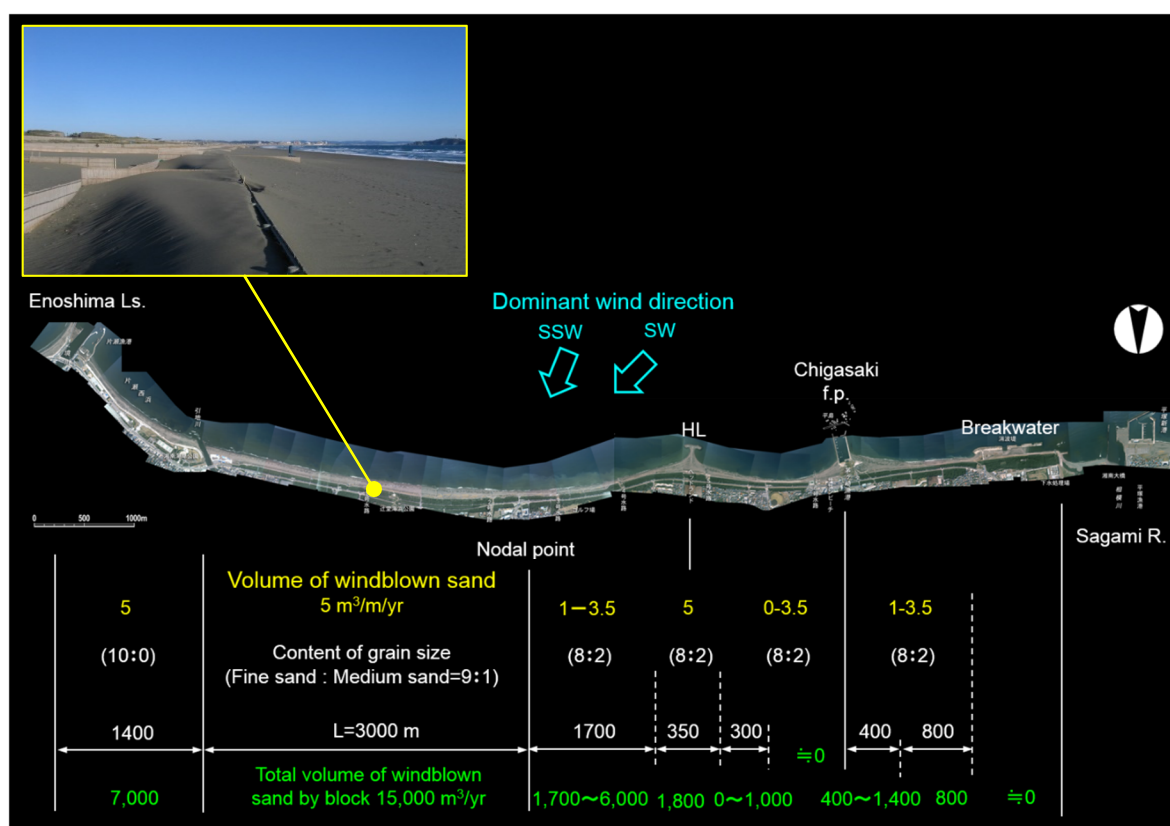
**Fig. 3.3.7** Conditions of beach nourishment, sand bypassing and sand back pass between 1996 and 2007. <sup>3)</sup>



**Fig. 3.3.8** Change in sand volume in blocks R and A. <sup>3)</sup>

## (2)沿岸の飛砂量

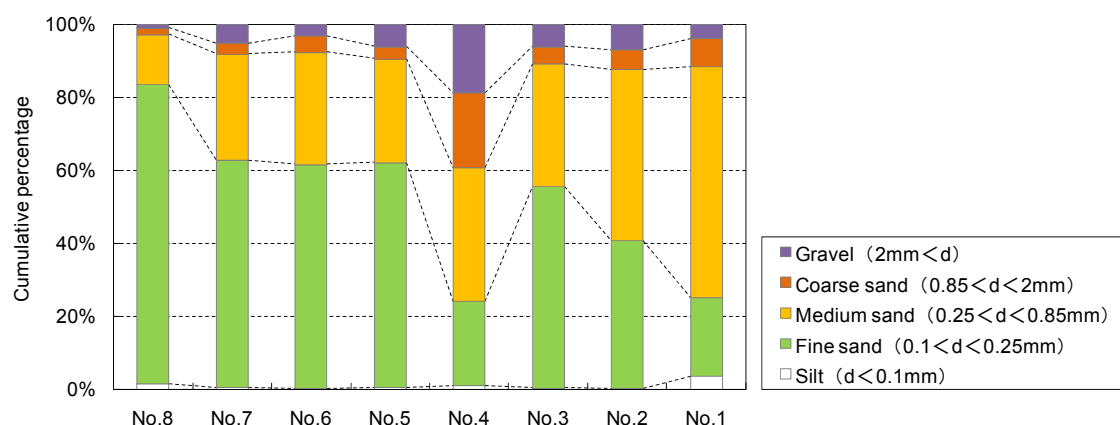
相模川からの土砂供給の激減等により侵食が進んでいる湘南海岸では、卓越する西寄りの風により常に一方向への飛砂が発生し、海浜背後の自転車道の埋没や海浜の土砂損失の要因になっている。平塚観測所における 10 m/s 以上の風速の方位別発生頻度によれば、強風時には N, SW, SSW の風が卓越する。湘南海岸は南に面しているため、飛砂を発生させる風は SW, SSW 方向の風である。このように東向きの沿岸漂砂の作用に、西寄りの風に伴う飛砂が重なる当海岸において、適切な海岸管理を進めるには飛砂の作用を無視できず、とくに養浜による海岸保全を行う場合には、その定量的検討が必要になる。様々な時間スケールの現象を基に推定した飛砂量の沿岸方向分布を **Fig. 3.3.9** に示す<sup>5)</sup>。これは、まず数千年の地形学的スケールとして縄文海進以降の砂丘発達より飛砂量を算出し、次に、風向と地形的特性および現地状況から飛砂が卓越する箇所を選定し、数十年から数年スケールの地形変化から飛砂量を算出し、さらに既往文献より飛砂量を調べ、これらを総括した上で飛砂量の沿岸分布を推定したものである。相模川～江ノ島間における年間推定飛砂量の総量は約  $3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$  であり、これは対象海岸の近年の沿岸漂砂量  $1 \sim 1.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$  の 2～3 倍に相当する。



**Fig. 3.3.9** Longshore distribution of windblown sand along Shonan coast.<sup>5)</sup>

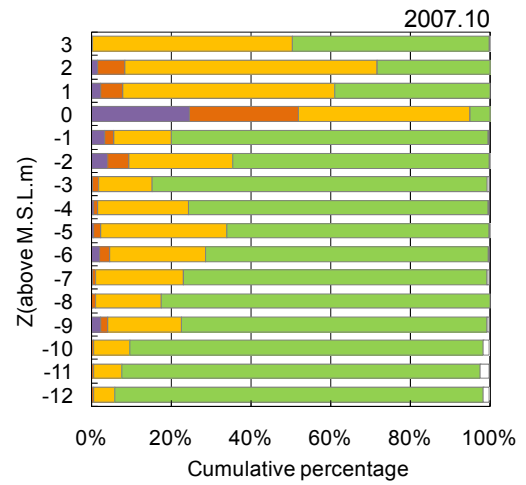
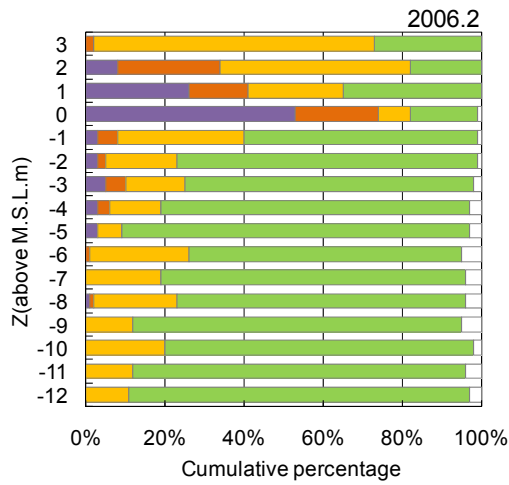
### (3)粒径を考慮した沿岸漂砂量

湘南海岸では、神奈川県により **Fig. 3.3.2** に示す 8 測線で底質調査が行われている。**Fig. 3.3.10** は各測線の T.P. +3~-9m 間の底質データ（2006 年）の平均値を、細砂、中砂、礫の 3 レンジで区分した断面平均の粒径含有率を示す。これによれば、沿岸漂砂の下手側の堆積域にある No. 7, 8 では細砂が多く含まれ、相模川河口に近くなるほど中砂の含有率が高まる。また、最も侵食が著しい中海岸の No.4 では礫分が多い。先に述べたように、堆積域では底質の堆積状況が漂砂の履歴を表わすことから、堆積土砂とほぼ同程度の底質含有率の漂砂が供給されたと仮定できる。**Fig. 3.3.11** は比較期間が 1 年半と短い、測線 No.6, 7, 8 における 2 時期（2006 年、2007 年）の底質組成の水深方向分布を比較を示す。期間中には 30 年確率規模の高波浪が来襲している。**Fig. 3.3.11** より、各測線とも細砂の割合が増えたようにも見えるが、大きな底質変化は生じていない。このことは、堆積域に存在する底質の含有率と同程度の含有率の砂が、沿岸漂砂によって連続的に運ばれてきたことを強く示唆している。そこで、測線間の底質データを補間し、細砂、中砂、粗砂以上の 3 つのレンジの含有率の沿岸方向分布を求めた結果が **Fig. 3.3.12** である。D ブロックは近年では僅かに侵食傾向にあるので、C-D 境界の粒径含有率については、ヘッドランドの先端水深 T.P.+3m 以深に存在する底質が漂砂により流入すると考え、**Fig. 3.3.13** に示すヘッドランド西側近傍の測線 No.5 の底質データの T.P.+4~-9 m の平均値とする。

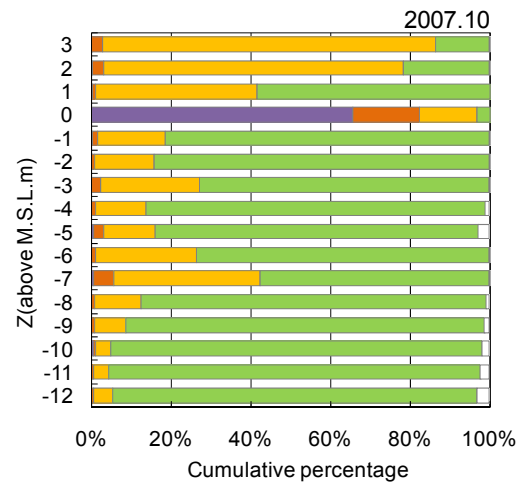
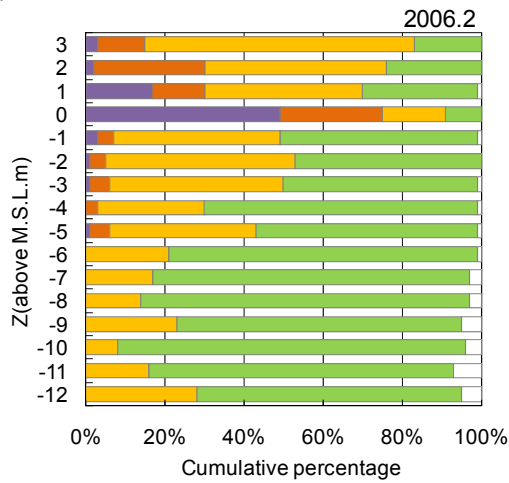


**Fig. 3.3.10** Contents of grain size averaged in depth range between +3 m and -9 m in each transect. <sup>3)</sup>

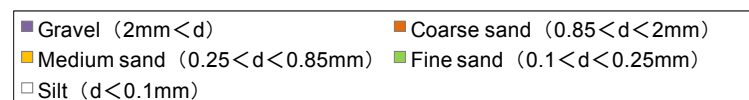
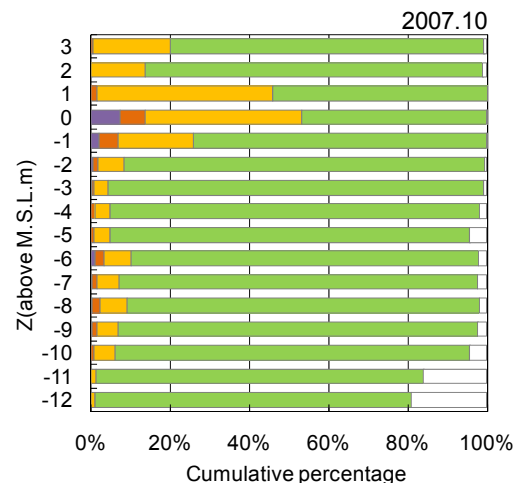
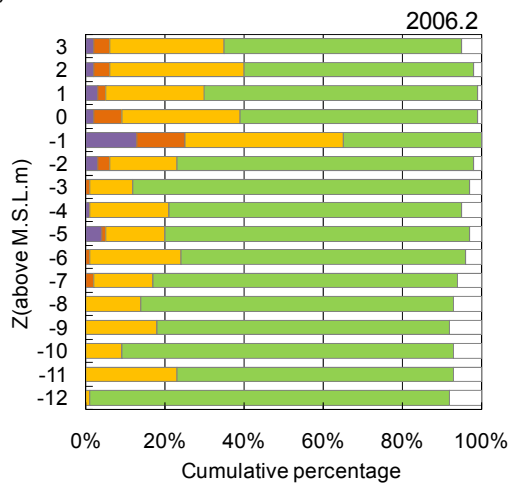
(a) No.6



(b) No.7



(c) No.8



**Fig. 3.3.11** Comparison of depth distribution of content of each grain size at transect Nos. 6, 7 and 8. <sup>3)</sup>

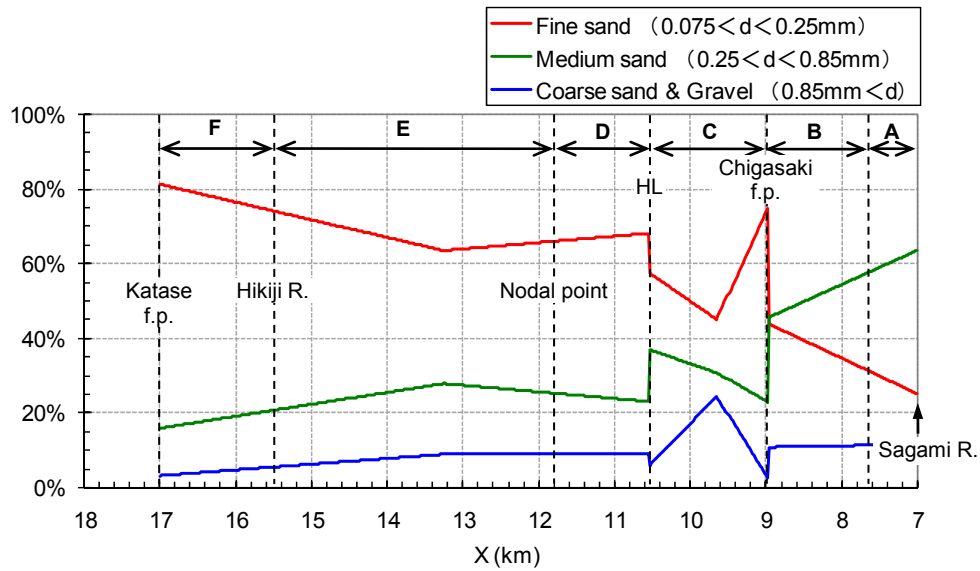


Fig. 3.3.12 Longshore distribution of content of each grain size.<sup>3)</sup>

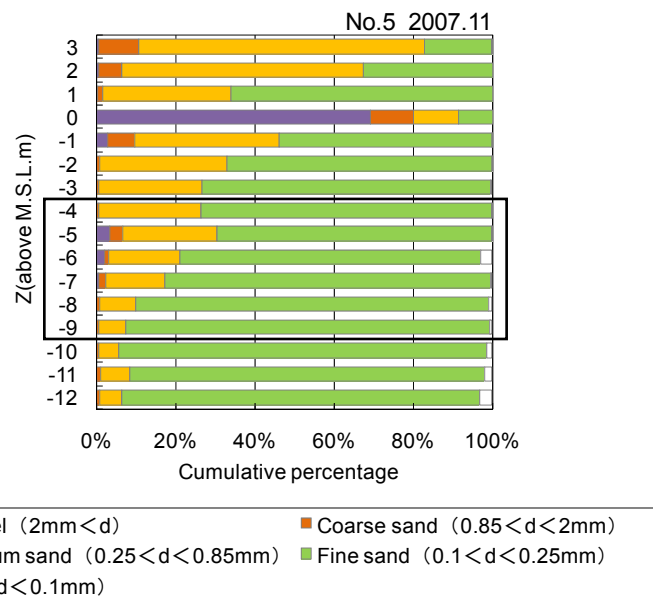


Fig. 3.3.13 Depth distribution of content of each grain size along transect No. 5.<sup>3)</sup>

次に、養浜等の要因を補正した年間単位幅当たりの地形変化量に、Fig. 3.3.12 の各地点で 3 レンジの含有率をそれぞれ乗じ、さらに漂砂下手端で  $Q=0$  として粒径毎に漂砂上手方向に積分し、それぞれの粒径ごとに沿岸漂砂量分布を算出したのが Fig. 3.3.14 である。この図は従来の沿岸漂砂量の分布に似ているが、粒径ごとに区分された沿岸漂砂分布であることが特徴である。



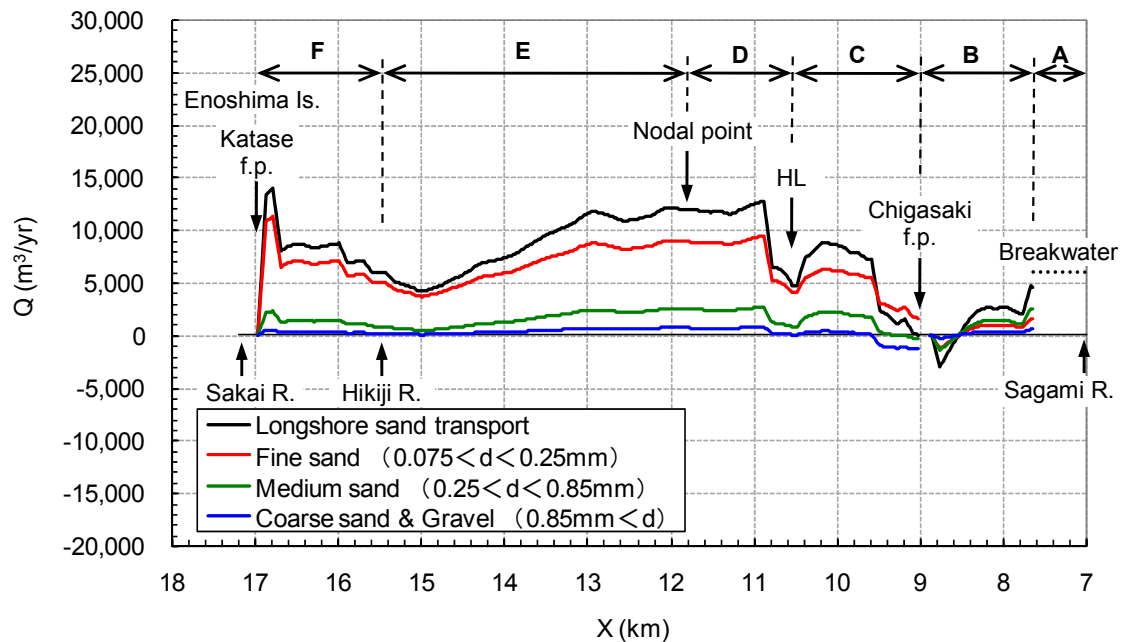


Fig. 3.3.14 Longshore distribution of longshore sand transport corresponding to each grain size component. <sup>3)</sup>

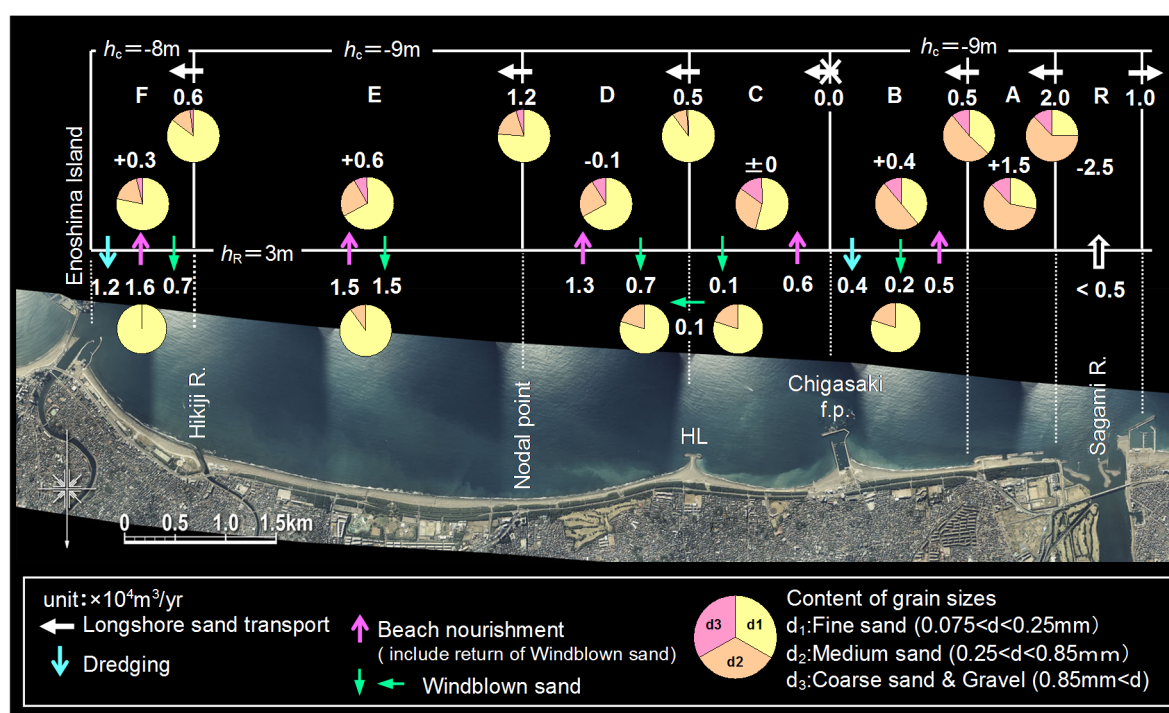
#### (4) 粒径を考慮した土砂動態（土砂収支）

以上の解析結果をとりまとめ、湘南海岸の粒径を考慮した土砂動態（土砂収支図）を **Fig. 3.3.15** に示す。この図には、各ブロックを跨ぐ沿岸漂砂量、各ブロック内における土砂量の変化、およびこれらの粒度分布、また海岸線を跨ぐ海と陸の間の土砂のやり取り（飛砂、養浜、浚渫など）を示す。粒度分布は、当海岸が主に細砂（0.075～0.25 mm）と中砂（0.25～0.85 mm）で構成されていることから、細砂  $d_1$ 、中砂  $d_2$ 、粗砂・礫  $d_3$  の3レンジで区分し、含有率を円グラフで示す。ブロック境界上、ブロック内の円グラフは、それぞれブロックを横切って通過する沿岸漂砂とブロック内の底質の粒径含有率を示す。また、陸域に示す円グラフは飛砂の粒径含有率を示す。

ここで、ブロック境界の漂砂量は **Fig. 3.3.14** より抽出し、粒径含有率は粒径毎の漂砂量の比で表す。C-D 境界の粒径含有率は、先に述べたように、ヘッドランドの先端水深 T.P.-3m 以深に存在する底質が漂砂により流入すると考え、ヘッドランド西側近傍の測線 No.5 の底質データの T.P.-4～-9 m の平均値とする。B～F ブロックの土砂量の変化は、汀線変化量に移動高とブロック延長を乗じたものとし、R,A ブロックについては **Fig. 3.3.8** より求めた水深変化量とする。粒径含有率はブロック内の平均値で表現する。また、R ブロックの相模川の流出土砂量は 0.5 万  $\text{m}^3/\text{yr}$  とする <sup>5)</sup>。なおこの量には海岸に寄与しないシルト・粘土分は含まれていない。一方、平塚新港の沖防波堤の先端水深は 6 m であり、 $h_c=9$  m 以浅であることか

ら、西向きの沿岸漂砂による西側海岸への土砂移動が考えられる。したがって、Rブロックで収支が合わない土砂量は沿岸漂砂によって西側へ運び去られたと仮定できる。

東側への細砂の移動は、波による東向きの沿岸漂砂のほかに、先に述べたように冬季の西風による飛砂がある。この飛砂は、海岸線と風向とのズレによって海岸線方向のみでなく、やや内陸へと移動する。その沿岸方向成分は **Fig. 3.3.9** に示したようにヘッドランド周辺や不動点（3号放水路）より東側の堆積域で大きく、また中海岸から菱沼海岸へヘッドランドを越えても砂が移動する。また、汀線域から飛砂によって内陸へ運ばれた砂は良く淘汰された粒径が  $0.25\text{ mm}$  以下の細砂である。飛砂により内陸へ運ばれた砂が除去された場合は、細粒分の損失を招くが、神奈川県では定期的な堆砂垣の改修工事時に、後浜上に堆積した砂を汀線付近まで戻しているため海浜砂の損失にはならない。土砂収支にはこのような人為的な土砂移動も考慮する。



**Fig. 3.3.15** Example of result of sand budget analysis considering grain size. <sup>3)</sup>

### 3.4. 土砂管理手法の検討（湘南海岸の例）

3.3 で述べたように、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 300 m 後退し、また茅ヶ崎中海岸においても約 50 m の後退が起きた<sup>4)</sup>。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<sup>7)</sup>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。そこで、湘南海岸を対象に、**Fig. 3.2.2** の検討フローに従って、粒径を考慮した土砂管理手法の検討例<sup>8)9)</sup>を以下に示す。

#### (1) 検討方法

相模川河口～江の島間 10 km を対象に、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地形変化予測モデルを構築し、このモデルを用いて土砂管理手法を検討する。再現計算は、漂砂環境の変化、構造物の設置状況より段階的に行う。具体的には、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  $\text{m}^3/\text{yr}$  の割合で土砂が流入し、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する。次に、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 年の地形変化を再現する。土砂管理手法の検討では、この構築したモデルを用いて、養浜、サンドバイパス、サンドリサイクルの範囲や量を様々変えた場合の地形変化を予測し、最適な手法を明らかにする。

#### (2) 計算モデル

様々な粒径からなる海岸の地形変化を予測するため、地形変化予測モデルには粒径を考慮した等深線変化モデル<sup>10)</sup>を用いる。このモデルは、海浜縦断形の安定化機構を組み込んだ等深線変化モデル<sup>11)</sup>に、沿岸漂砂、岸沖漂砂による粒径分級を考慮した等深線変化モデルである。等深線変化モデルでは、沿岸方向に  $x$  軸、沖向きに  $y$  軸、 $xy$  平面の中に  $z=z_1, \dots, z_k$  に対応する等深線を設定し、 $z$  を上向きの鉛直座標、 $t$  を時間として、沿岸方向各地点  $x$  から各等

深線までの沖向き距離  $Y(x, z, t)$  で地形を表現する．各等深線の変化量は，初期地形と入射波条件を与え，沿岸漂砂量，岸沖漂砂量を計算し，砂の連続式で繰り返し計算を行うことで求める．

粒径毎の沿岸漂砂量式は式(1)で，岸沖漂砂量式は式(2)で表わされる．

$$q_x^{(k)} = \mu^{(k)} \cdot \varepsilon_x(z) \cdot K_1^{(k)} \cdot (EC_g)_b \cdot \cos \alpha_{bs} \left( \sin \alpha_{bs} - \xi \frac{1}{\tan \beta} \cdot \frac{\partial H_b}{\partial x} \right) \quad (1)$$

$; k = 1, 2, \dots, N$

$$q_z^{(k)} = \mu^{(k)} \cdot \varepsilon_z(z) \cdot \gamma \cdot K_1^{(k)} \cdot (EC_g)_b \cos^2 \alpha_{bs} \sin \bar{\beta} \cdot (\cot \beta / \cot \beta_c^{(k)} - 1) \quad (2)$$

$; k = 1, 2, \dots, N$

$$K_1^{(k)} = \frac{A}{\sqrt{d^{(k)}}} \quad (3)$$

$; k = 1, 2, \dots, N$

$$\varepsilon_z(z) = \begin{cases} = \frac{2}{h_c^3} \left( \frac{h_c}{2} - z \right) (z + h_c)^2 & \dots\dots\dots (-h_c \leq z \leq h_R) \\ = 0 & \dots\dots\dots (z < -h_c, h_R < z) \end{cases} \quad (4)$$

ここに， $x$ は沿岸方向座標， $z$ は等深線の地盤高， $q_x^{(k)}, q_z^{(k)}$ は粒径毎（ $N$ 粒径）の沿岸・岸沖漂砂量（ $k=1, 2, \dots, N$ ）， $\mu^{(k)}$ は交換層内の粒径毎の含有率である． $(EC_g)_b$ は砕波点での波エネルギーフラックス， $\alpha_{bs}$ は砕波点の波峰線が等深線となす角， $H_b$ は砕波波高である． $K_1^{(k)}$ は沿岸漂砂量係数であり，係数  $A$  と底質粒径  $d^{(k)}$ （単位 mm）より式(3)で与えられる． $\gamma$ は岸沖・沿岸漂砂量係数比であり，沿岸漂砂に対する岸沖漂砂の動き易さを示す．また， $\xi = K_2^{(k)} / K_1^{(k)}$ とし， $K_2^{(k)}$ は島や防波堤による波の遮蔽効果によって沿岸漂砂が強まる効果を表現する Ozasa & Brampton 項の係数であり，係数  $A$ ， $\gamma$ とともに対象海岸の変形過程に応じて設定する． $\varepsilon_z(z), \varepsilon_x(z)$ は漂砂量の水深方向分布関数<sup>12)</sup>であり，本研究では両者は等しいとして式(4)で与える． $\beta_c^{(k)}$ は粒径毎の平衡勾配角を示す． $\beta$ は等深線毎の勾配角， $\tan \beta$ は海底勾配である． $\bar{\beta}$ は，初期縦断形において，バーム高（ $h_R$ ）から波による地形変化の限界水深（ $h_c$ ）までの平均勾配角である．漂砂式の物理的考え方は次のとおりである．まず沿岸漂砂式（式(1)）については，基本的な考え方として，等深線が波向と斜交すればその度合いに応じた強さの沿岸漂砂が波向の下手側に向けて生じ，等深線が波向と直交すれば沿岸漂砂は生じない

という機構 (**Fig. 3.4.1**) を式(1)は表現している．次に岸沖漂砂式 (式(2)) については，岸沖漂砂は，海浜縦断形に対して，重力による斜面下方に向かう作用と，波による斜面上方への作用が均衡しているときの海底勾配  $\tan\theta$  ( $=1/\cot\theta$ ) を平衡勾配  $\tan\theta_c$  ( $=1/\cot\theta_c$ ) と考える．海浜縦断形の局所勾配が平衡勾配にあるとき岸沖漂砂は生じない．平衡勾配よりも急勾配になると沖向きの漂砂が，緩勾配になると岸向きの漂砂が生じる，という機構 (**Fig. 3.4.2**) を式(2)は表現している．砂移動は，波による地形変化の限界水深  $h_c$  と波のうちあげ高で定まる  $h_R$  で挟まれた区間で生じる．沖合から岸向きに輸送される波エネルギーは  $(EC_g)_b$  であるが，これは碎波減衰，海浜へのうちあげを経て消失する．このとき消失したエネルギーに相応する仕事が海浜になされ， $-h_c$  から  $h_R$  の範囲の海底面で土砂移動が起こる (**Fig. 3.4.3**)．また，海浜変形は碎波帯や汀線付近では著しく，沖合では小さいことから，沿岸漂砂，岸沖漂砂の強さは水深方向分布をもつ (**Fig. 3.4.4**)．式(4)はこの分布を表している．

次に，粒径毎の等深線変化量  $\Delta y^{(k)}$  は，各等深線につき粒径毎の土砂量保存則 (連続式) により式(5)で算定する．混合粒径 (全粒径) に応じた等深線変化量  $\Delta y$  は，等深線毎に粒径毎の等深線変化量  $\Delta y^{(k)}$  を合計した式(6)で算定する．

$$\frac{\partial y^{(k)}}{\partial t} = -\frac{\partial q_x^{(k)}}{\partial x} - \frac{\partial q_z^{(k)}}{\partial z} \quad ; k = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = \sum_{k=1}^N \frac{\partial y^{(k)}}{\partial t} \quad (6)$$

等深線毎の交換層内での粒径毎の含有率算定は，交換層内での粒径毎の土砂収支式を用いる．堆積時での新たな粒径毎の含有率は式(7)，侵食時は式(8)で与えられる．

$$\frac{\partial \mu^{(k)}}{\partial t} = \frac{1}{B} \left\{ \frac{\partial y^{(k)}}{\partial t} - \frac{\partial Y}{\partial t} \cdot \mu^{(k)} \right\} \quad ; k = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

$$\frac{\partial \mu^{(k)}}{\partial t} = \frac{1}{B} \left\{ \frac{\partial y^{(k)}}{\partial t} - \frac{\partial Y}{\partial t} \cdot \mu_B^{(k)} \right\} \quad (8)$$

$; k = 1, 2, \dots, N$

ここに， $\mu_B^{(k)}$  は等深線変化前の交換層より岸側位置の含有率を示す．本モデルにおいては全等深線で交換層幅  $B$  は一定とする．

数値計算は、粒径毎の沿岸・岸沖漂砂量  $q_z$  を式(1)～(4)で計算し、これを用いて連続式(5), (6)を解くことで等深線変化量が計算され、さらに交換層内の含有率の変化が式(7), (8)より計算される。これを繰り返すことで海浜地形の経時変化が計算される。限界水深以深への重力による土砂の落ち込み、陸上の浜崖の形成による地形変化は芹沢ら<sup>11)</sup>の方法とする。また、数値計算にはスタッガードメッシュを用いた陽形式の差分法とする。

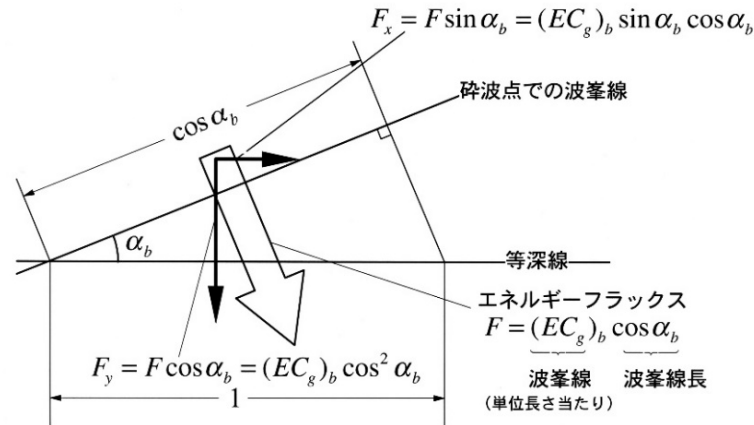


Fig. 3.4.1 Concept of contour lines based on wave directions and longshore sand transport.<sup>11)</sup>

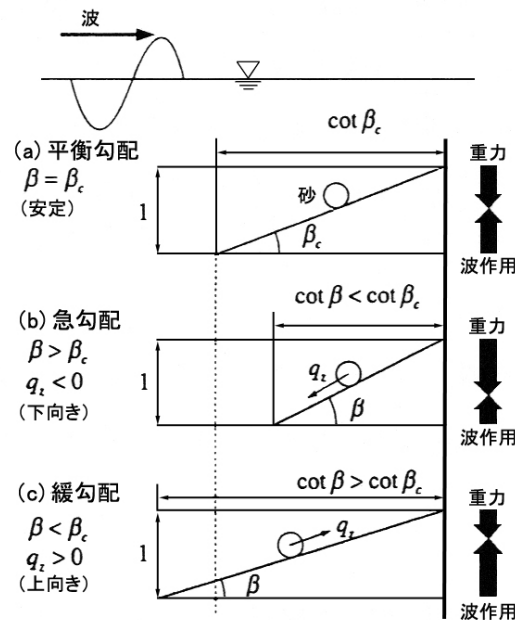


Fig. 3.4.2 Stabilization mechanism of beach profile based on equilibrium between gravity effect and wave action.<sup>11)</sup>

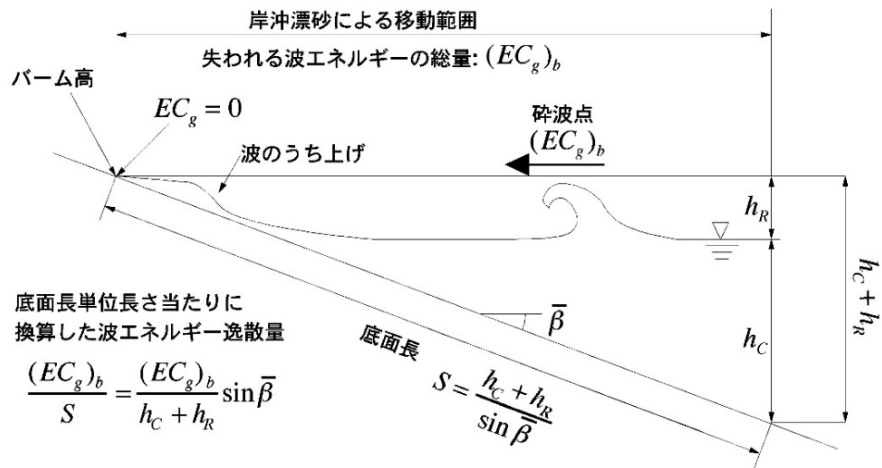


Fig. 3.4.3 Quantity of wave energy.<sup>11)</sup>

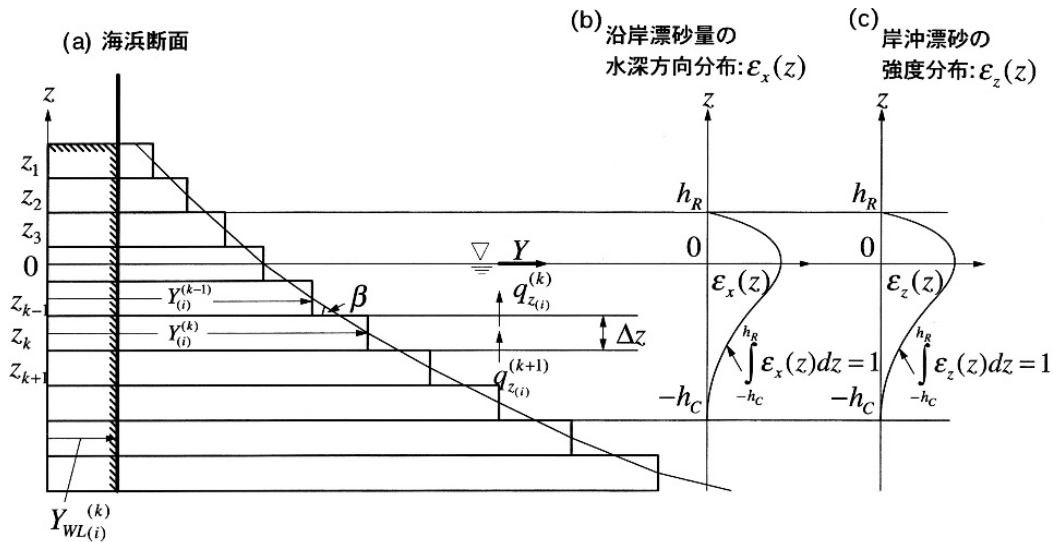


Fig. 3.4.5 Depth distribution of power of longshore sand transport and offshore sand transport.<sup>11)</sup>

### (3) 計算条件

入射波条件は、湘南海岸におけるエネルギー平均波（波高 0.83 m，周期 6.4 s），波向は、江ノ島や烏帽子岩，平島，茅ヶ崎漁港などによる波の遮蔽が海浜変形に影響するため，沖の入射波向を変えて方向分散法<sup>13)</sup>によってトライアル計算を行い，再現計算より同定した波向 S13° E とする．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： $d < 0.25$  mm，中粒： $0.25 < d < 0.425$  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 とする．飛砂は，細粒分が多く含まれる水深 3 m 以浅の等深線から，Fig. 3.4.6 に示す飛砂量に相当する



細粒分を取り除く方法を用いる。これは、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、これが飛砂として漂砂系外へ流出することに相当する。この場合、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する。計算条件を **Table 3.4.1** に示す。

**Table 3.4.1** Calculation conditions

Calculation domain	Coastline of 11 km stretch between Sagami River and Enoshima Island
Reproduction calculation	Bathymetry in 1945 under natural conditions and that in 2007 given bathymetry in 1945
Calculation cases	Case 1 Continuation of beach nourishment since 1996 Case 2 Suspension of beach nourishment Case 3 Regional sand management to achieve planned shoreline Case 4 Regional sand management to maintain planned shoreline
Incident wave condition	Energy-mean waves ( $H_{1/3}=0.83$ m and $T=6.35$ s) and wave direction: S13°E
Tide level	Mean sea level
Depth of closure $h_c$ and berm height $h_R$	$h_c = -9$ m $h_R = 3$ m
Depth range of calculation	Between $Z=+5$ m and $Z=-12$ m
Mesh size	$\Delta X=500$ m and $\Delta Z=1$ m
Time intervals	$\Delta t=400$ hrs (22 steps: one year)
Grain size	Three grain sizes $d_1$ , fine material ( $d<0.25$ mm), $d_2$ , medium material ( $0.25<d<0.425$ mm) and $d_3$ , coarse material ( $0.425\text{ mm}<d$ ) Characteristic grain size, equilibrium slope and thickness of exchange layer $d_1=0.15$ mm, $\tan\beta=1/100$ , 0.5 m, $d_2=0.20$ mm, $\tan\beta=1/40$ , 1.25 m, $d_3=1.00$ mm, $\tan\beta=1/10$ , 5 m Content of each grain size $\mu_1: \mu_2: \mu_3=0.58 : 0.32 : 0.10$
Coefficient of sediment transport rate	Coefficient of longshore sand transport $K_x=A/\sqrt{d_{50}}$ , $A=0.070$ $d_1: K_x=0.18$ , $d_2: K_x=0.16$ , $d_3: K_x=0.07$ Coefficient used by Ozasa and Brampton (1980) $K_2=1.62 K_x (\tan\beta=1/30)$ Coefficient of cross-shore sand transport $K_z=0.14 K_x$
Critical slope of sinking of sand	1/2 on land and 1/3 on seabed
Boundary conditions	$q_x=1.1\times 10^5$ m <sup>3</sup> /yr until 1945 at right boundary $7.3\times 10^4$ m <sup>3</sup> /yr ( $d_1$ ), $2.8\times 10^4$ m <sup>3</sup> /yr ( $d_2$ ) and $0.9\times 10^4$ m <sup>3</sup> /yr ( $d_3$ ) $q_x=0$ after 1945, $q_x=0$ at left boundary, $q_z=0$
Wave transmission coefficient	Chigasaki fishing port breakwater and artificial headland: $K_t=0.3$ , Offshore rocks: $K_t=0.6$

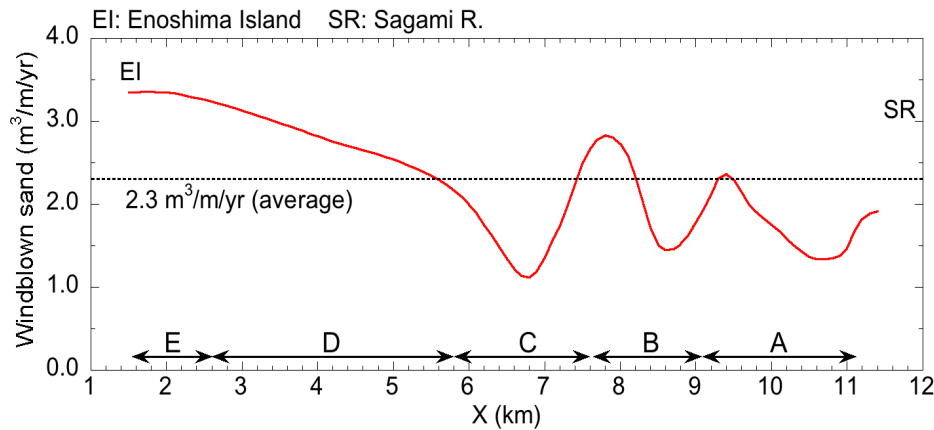
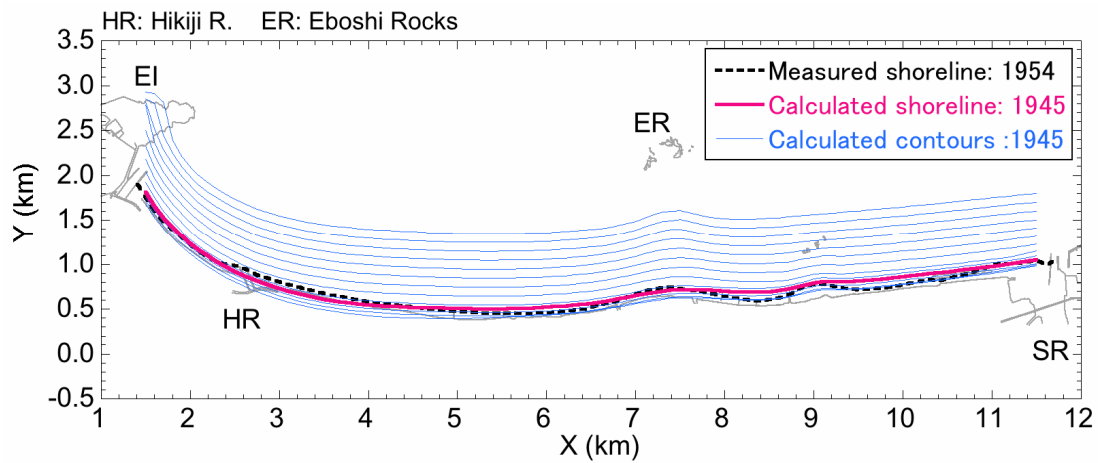


Fig. 3.4.6 Longshore distribution of windblown sand along Shonan coast.<sup>9)</sup>

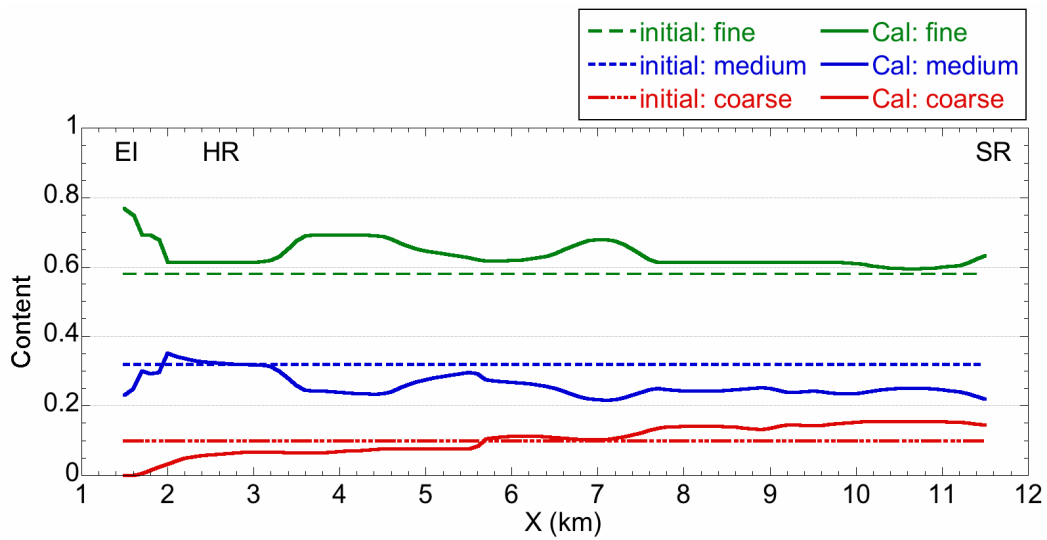
#### (4)再現計算

再現計算は、漂砂環境の変化、構造物の設置状況より 5 段階で行う。自然状態にあった 1945 年地形の再現等深線を Fig. 3.4.7、各粒径成分の含有率の沿岸方向分布を Fig. 3.4.8 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 (SR) 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 (EI) や烏帽子岩 (ER) 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ている。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。次に、この結果を用いて 2007 年まで段階的に地形変化の再現計算を行う。2007 年地形の再現等深線と実測汀線を Fig. 3.4.9、汀線変化量を Fig. 3.4.10、各粒径成分の含有率の沿岸方向分布を Fig. 3.4.11 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、区域 A (柳島海岸 ;  $X=10.0\sim10.3$  km) で 0.3 万  $m^3/yr$ 、区域 B (中海岸 ;  $X=8.4\sim8.6$  km) で 0.6 万  $m^3/yr$ 、区域 C (菱沼海岸 ;  $X=7.1\sim7.3$  km) で 0.5 万  $m^3/yr$ 、区域 E (片瀬・鵜沼海岸 ;  $X=2.2\sim2.4$  km) で 0.9 万  $m^3/yr$  であり、計算ではこれらを考慮している。相模川河口部を除けば全体的な汀線変化傾向は実測とよく対応しており、茅ヶ崎漁港 (CFP) 下手やヘッドランド (HL) 下手の汀線後退など、海岸保全を検討する上で重要な侵食域の再現性も高い。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。

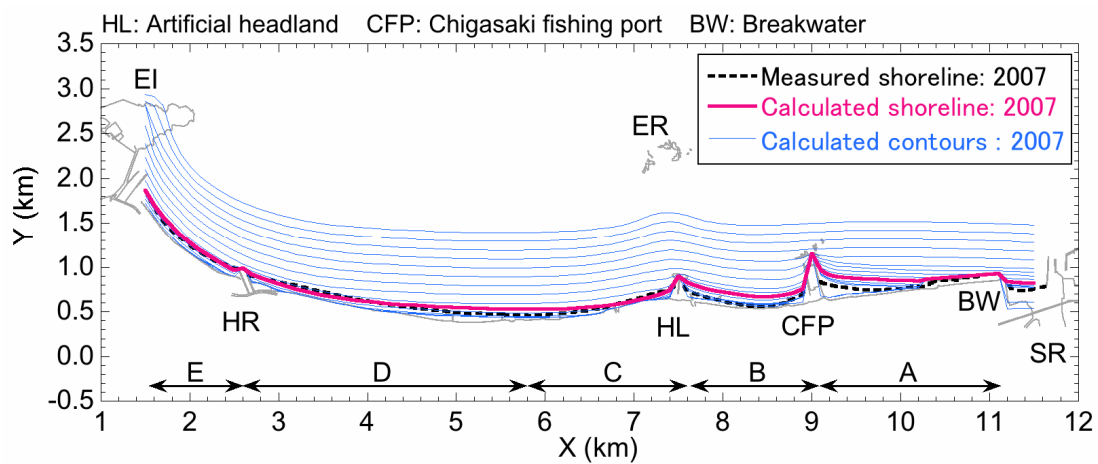
このように、相模川河口~江の島まで 10km の漂砂系全体の海岸に対し、相模川からの土砂流入や飛砂による海岸線からの細砂の損失も含めて、自然状態にあった 1945 年から 2007 年までの長期的な海浜変形は、粒径を考慮した等深線変化モデル<sup>10)</sup>により再現することができる。



**Fig. 3.4.7** Reproduced bathymetry of Shonan coast in 1945.<sup>9)</sup>



**Fig. 3.4.8** Reproduced longshore distribution of grain size in 1945.<sup>9)</sup>



**Fig. 3.4.9** Reproduced bathymetry of Shonan coast in 2007.<sup>9)</sup>

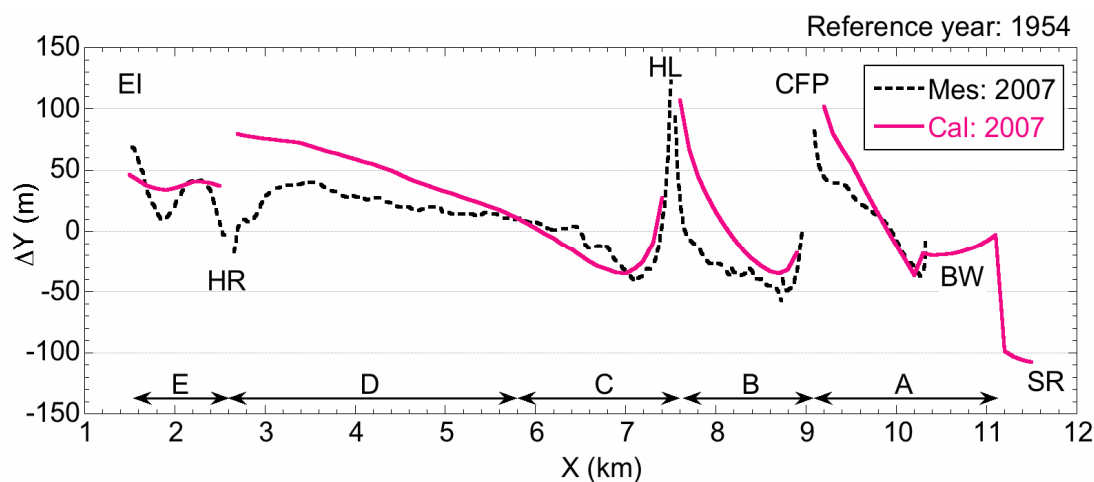


Fig. 3.4.10 Shoreline changes up to 2007. <sup>9)</sup>

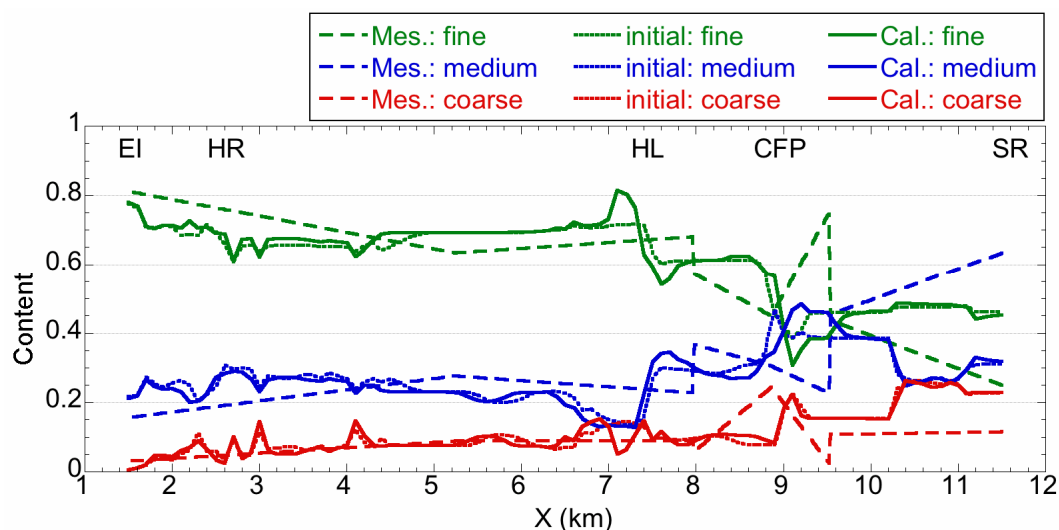


Fig. 3.4.11 Reproduced longshore distribution of grain size up to 2007. <sup>9)</sup>

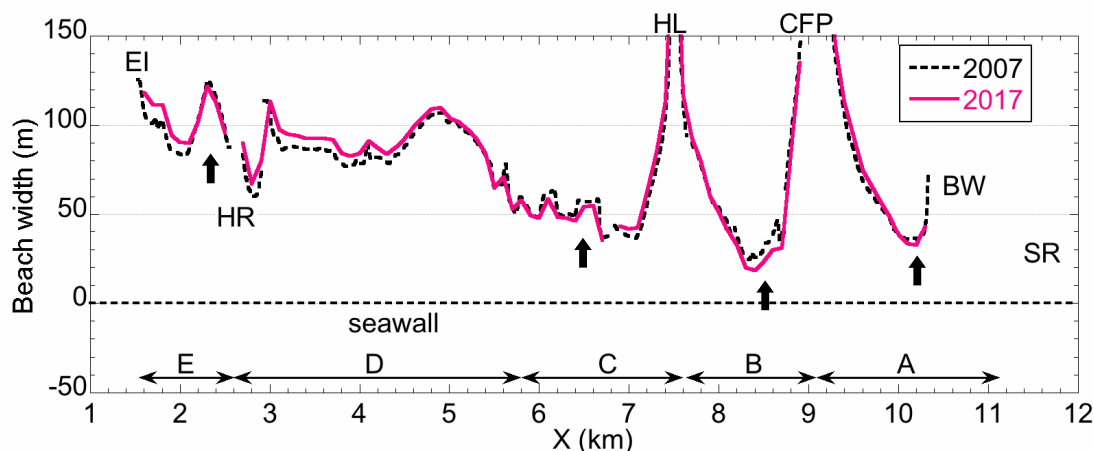
##### (5) 土砂管理手法の検討（将来予測計算）

構築したモデルを用いて、砂浜による海岸保全を進めるための土砂管理手法の検討を行う。まず、養浜などの土砂管理を行わず放置した場合の予測計算を行い、次に、この結果をふまえて土砂管理手法の検討を行う。具体的な土砂管理として、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、サンドバイパスについて検討する。予測計算では、養浜材の投入位置や投入量、サンドリサイクル、サンドバイパスの採取・投入位置や量を様々変えて海岸保全効果や周辺海岸に与える影響を定量的に検討する。なお、養浜材は、実際に調達可能な材料

とし、対象海岸の場合は、養浜材として想定される相模ダムの浚渫土砂とし、その粒度組成は実際の浚渫土砂の平均値 ( $\mu_1 : \mu_2 : \mu_3 = 0.20 : 0.27 : 0.53$ ) を用いる。

養浜などの土砂管理を行わず放置した場合（ケース 1）の今後 10 年間の浜幅変化を **Fig. 3.4.12** に示す。区域 A（柳島海岸）の消波堤の下手、区域 B,C（中海岸，菱沼海岸），区域 E（片瀬・鵜沼海岸）の引地川（HR）下手で侵食が進み、汀線が後退する。このことから、汀線を維持するためには、適切な土砂管理が必要なことが明らかである。

湘南海岸では、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）が定められている。計画汀線を達成するための最適案（ケース 2）を **Fig. 3.4.13** に示す。区域 A で 0.5 万  $\text{m}^3/\text{yr}$ ，区域 B で 3 万  $\text{m}^3/\text{yr}$  の養浜，区域 D（ $X=4.5\sim 5.4 \text{ km}$ ）から年間当たりの飛砂量程度 1.5 万  $\text{m}^3/\text{yr}$  を採取し、そのうちの 1 万  $\text{m}^3/\text{yr}$  を区域 C（ $X=6.7\sim 6.9 \text{ km}$ ）にサンドリサイクル，残りの 0.5 万  $\text{m}^3/\text{yr}$  を区域 E（ $X=2.2\sim 2.4 \text{ km}$ ）にサンドバイパスすることで，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きる。また，サンドバイパス，サンドリサイクルを実施しても区域 D（辻堂海岸）の汀線が後退しない。一方，底質の変化については，**Fig. 3.4.14** 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区域 B では底質の粗粒化が進む。**Fig. 3.4.13** の予測地形を初期地形として，計画汀線達成後の海岸を維持するために必要な土砂管理手法の最適案（ケース 3）を **Fig. 3.4.15** に示す。区域 A で 0.25 万  $\text{m}^3/\text{yr}$ ，区域 B で 1 万  $\text{m}^3/\text{yr}$  の養浜，区域 D（ $X=4.5\sim 5.4 \text{ km}$ ）から区域 C（ $X=6.7\sim 6.9 \text{ km}$ ）にサンドリサイクルを 1 万  $\text{m}^3/\text{yr}$ ，区域 E（ $X=2.2\sim 2.4 \text{ km}$ ）にサンドバイパスを 0.5 万  $\text{m}^3/\text{yr}$  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区域 D の汀線が現状より後退することはない。



**Fig. 3.4.12** Changes in beach width up to 2017 in Case 1.<sup>9)</sup>

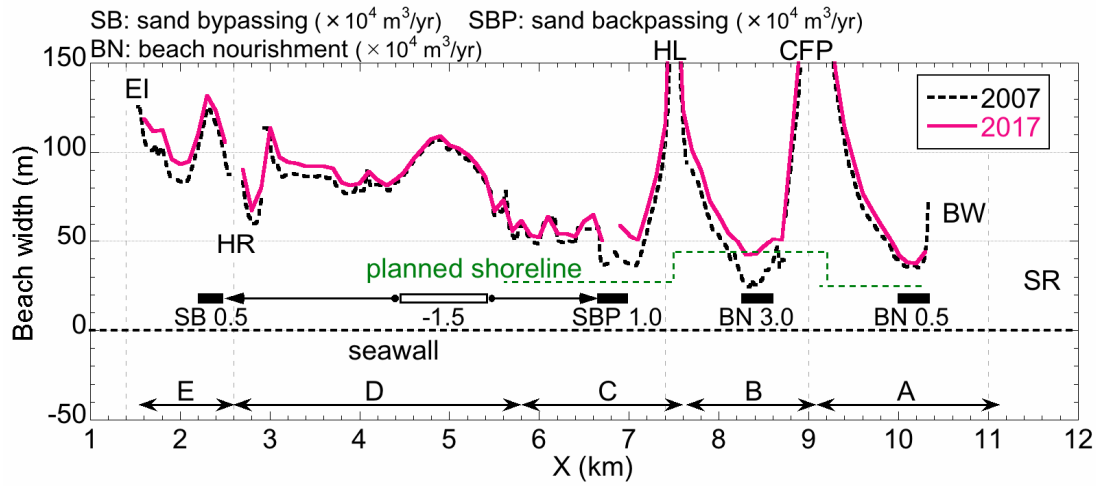


Fig. 3.4.13 Changes in beach width up to 2017 in Case 2.<sup>9)</sup>

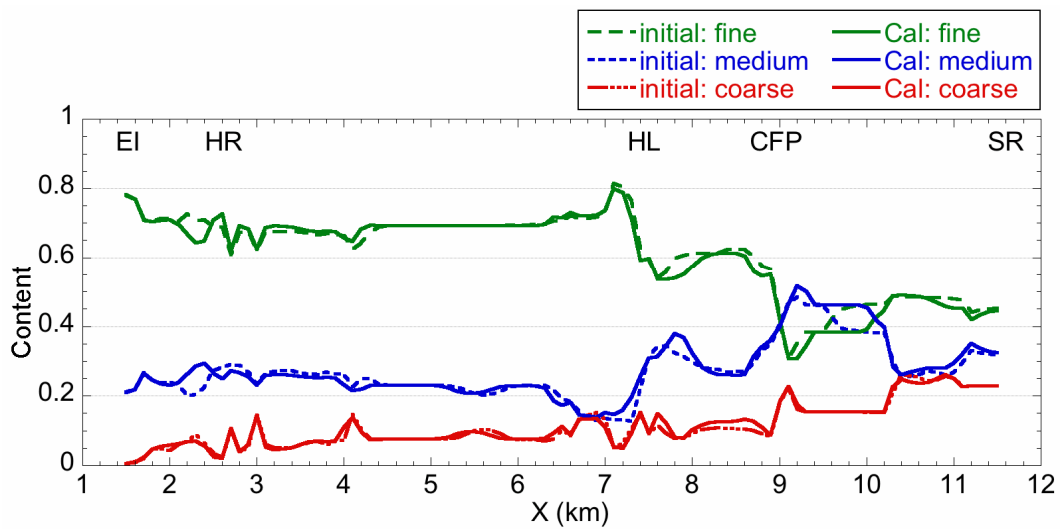


Fig. 3.4.14 Changes in longshore distributions of each grain size up to 2017 in Case 2.<sup>9)</sup>

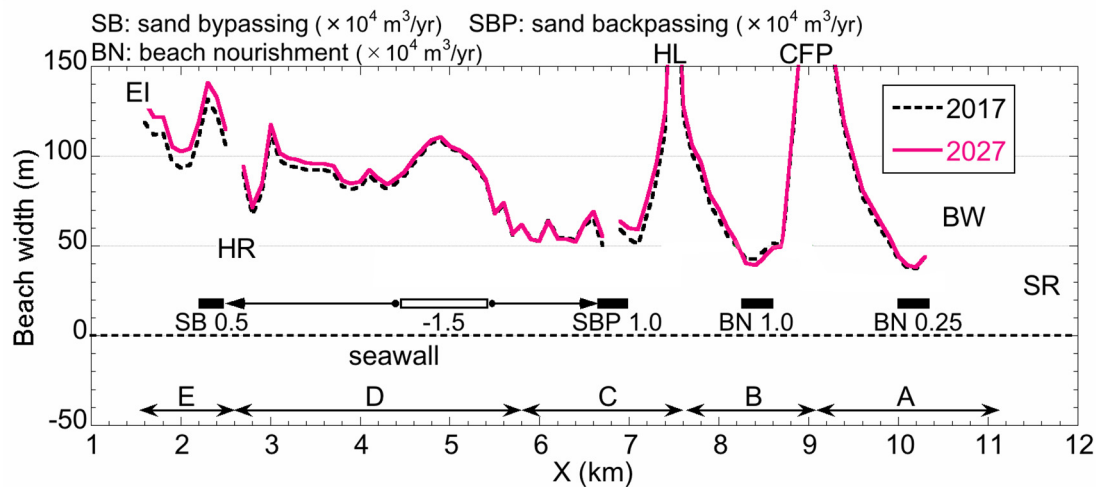


Fig. 3.4.15 Changes in beach width up to 2017 in Case 3.<sup>9)</sup>

## (6)湘南海岸の土砂管理手法案

地形変化予測モデルによる検討結果より，長期的に砂浜を保全するための粒径を考慮した湘南海岸全域の土砂管理は，粗砂や礫を 50%程度含む相模ダムの浚渫土砂などを用いた粗粒材養浜を区域 A で  $0.25 \text{ 万 m}^3/\text{yr}$ ，区域 B で  $1 \text{ 万 m}^3/\text{yr}$  実施し，さらに堆積域の区域 D から年間当たりの飛砂量に相当する  $1.5 \text{ 万 m}^3/\text{yr}$  を採取して区域 C にサンドリサイクル  $1 \text{ 万 m}^3/\text{yr}$ ，区域 E にサンドバイパス  $0.5 \text{ 万 m}^3/\text{yr}$  を実施する方法が有効と考えられる (Fig. 3.4.16) . この場合，サンドリサイクル，サンドバイパスの供給源となる区域 D では， $1.5 \text{ 万 m}^3/\text{yr}$  程度の砂を採取しても汀線は後退しないことから，今後，区域 A の茅ヶ崎漁港西側でも堆砂が進むと考えられるので，必要に応じてこの堆砂域からのサンドバイパスも有効である。

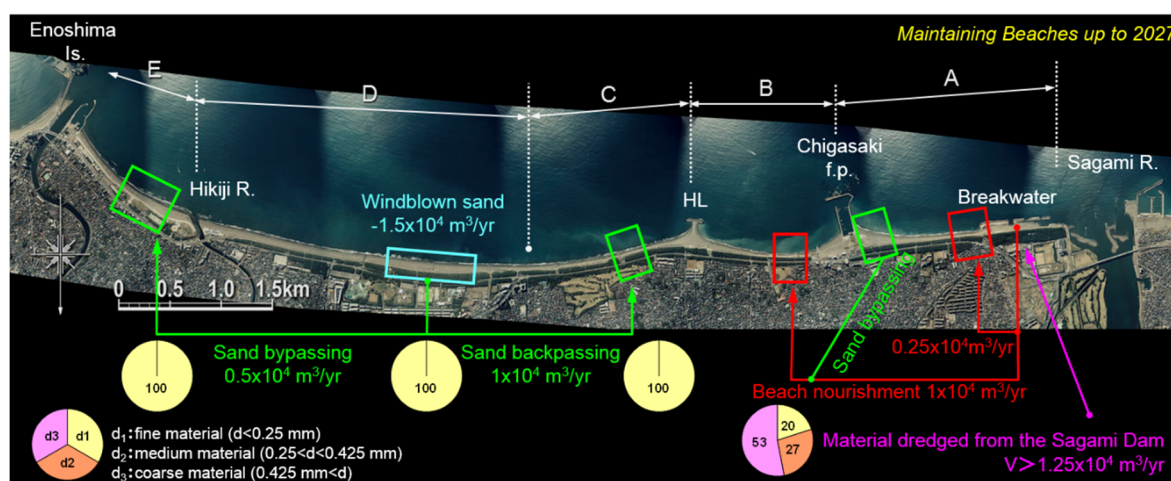


Fig. 3.4.16 Example of comprehensive sediment management considering volume of sand and grain size.<sup>9)</sup>



### 3.5. 結言

海岸侵食が進む海岸において、河川からの土砂供給が期待できない状況で、将来にわたって計画的、かつ確実に砂浜による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。3 章では、粒径を考慮した土砂動態の解析手法や土砂管理手法の検討方法を提案し、実際に相模川河口から江ノ島の間広がる延長 11km の湘南海岸を例に、土砂動態の解析と中長期的な土砂管理手法の検討例を示した。土砂管理手法の検討では、過去の地形変化を再現した地形変化予測モデルを用いることで、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。

本研究では、粒径を考慮した土砂動態の解析において、漂砂の粒径含有率を、現地データを基本に与えた。一方、沿岸漂砂量は水深方向に分布を持っており、一般に汀線近傍が最も大きい。また、汀線近傍の海浜の構成材料は主に中砂、礫であり、粒径が大きいほど動きにくい。したがって、厳密に言えばこれらの点を考慮する必要がある、今後の課題とする。

### 参考文献

- 1) 宇多高明, 細川順一, 三波俊郎, 宮原志帆, 芹沢真澄, 石川仁憲: 河口デルタ復元に要する期待流出土砂量・神奈川県相模川の例-, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.68, No.4, I\_1711-I\_1716, 2012.
- 2) 宇多高明, 青島元次, 鮫島 強, 吉岡 敦, 三波俊郎, 石川仁憲: 粒径を考慮した土砂収支検討・湘南海岸の例, 海岸工学論文集, 第 55 巻, pp.726-730, 2008.
- 3) 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, pp. 1-12.
- 4) 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): 長期深浅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.
- 5) 相模川水系土砂管理懇談会(2003):「相模川の健全な土砂環境をめざして 提言書(参考資料)」.
- 6) 宇多高明, 青島元次, 吉岡 敦, 三波俊郎, 石川仁憲: 湘南海岸における飛砂量の検討, 海洋開発論文集, 第 24 巻, pp.1195-1200, 2008.
- 7) 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.
- 8) 石川仁憲, 宇多高明, 古池 鋼, 鮫島 強, 吉岡 敦: 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, 海岸工学論文集, 第 57 巻, pp.641-645, 2010.
- 9) Ishikawa, T., Uda, T., Furuike, K. and Yoshioka, A. 2011. Regional sediment management

considering volume of sand and grain size, Coastal Sediments '11, pp. 2033-2046.

- 10) 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.
- 11) 芹沢真澄・宇多高明・三波俊郎・古池 鋼・熊田貴之 (2002) : 海浜縦断形の安定化機構を組み込んだ等深線変化モデル, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp.496-500.
- 12) 宇多高明・河野茂樹 (1996) : 海浜変形予測のための等深線変化モデルの開発, 土木学会論文集, No. 539 / II-35, pp. 121-139.
- 13) 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.

## 4. 新たな養浜手法 I

### 4.1. 緒言

養浜材の粒径によって海岸保全効果は大きく異なる。現地の前浜底質に対して粒径が細かい養浜材を用いた場合は、平衡勾配が小さいことから養浜材の安定性が低く、沖へ流出しやすい。一方、礫などの粗粒材の場合は平衡勾配が大きいため安定性が高く、前浜の拡幅に効果的である。このような考えを基に、2005 年以降、第一義的に汀線の前進を図ることを目的として、歩留まりの良い礫を用いた粗粒材養浜が数箇所で行われた<sup>1)</sup>。これらの海岸では、投入した礫は護岸前面に急勾配で堆積し、高波浪の作用を受けても沖への流出はほとんどなく安定性が高いことが確認された。このように粗粒材を用いた養浜は、海岸保全に効果的であるが、分級を必要とすることから養浜材のコストが高く、養浜材の調達のみから課題がある。一方向沿岸漂砂が卓越する海岸では、動的養浜の継続的实施によって砂浜の保全機能の維持を図ることから、将来に渡って安定的な養浜材の確保と、より海岸保全に効果的で経済的に優れた手法が必要とされる。

4 章では、より効果的かつ経済的な新たな養浜手法として、流砂系の土砂連続性の観点に基づき、本来、海岸への土砂供給源であった流砂系の堆砂を活用し、適切な粒度組成の混合粒径材料を用いて、前浜だけでなく沖浜も含めて海岸全域の保全を図る手法について提案した。次に、湘南海岸の上手側に位置し、2005 年までに著しい侵食が起きた茅ヶ崎中海岸を例に、現地データの解析や数値計算による新たな養浜手法の検討方法を取りまとめた<sup>2) 3)</sup>。さらに、同海岸において実際に養浜が行われたことから、養浜後の地形変化<sup>4) 5) 9) 10)</sup>より、新たな養浜手法の妥当性を評価した。

### 4.2. 適切な混合粒径材料を用いて海岸全域の保全を図る養浜手法の提案

鹿島灘に面した神向寺海岸では、両端をヘッドランドにより区切られた 900 m 区間に、現地海岸の底質粒径  $d_{50}=0.2$  mm に対し、15~65 倍の粒径 3~13 mm の 6, 7 号碎石を用いた 8.7 万  $m^3$  の粗粒材養浜が行われた<sup>1)</sup>。養浜前後の海岸状況の変化を Fig. 4.2.1 に示す。2002 年 9 月はヘッドランド間に前浜はほとんどなく、護岸前面の消波工に直接波が作用する状況であったが、2009 年 5 月には前浜が大きく広がった。2009 年 5 月は、夏季の静穏波の作用で投入礫が砂により覆われているが、底質調査結果によれば、粗粒材養浜後には水深 3 m 以浅において礫分が大きく増加した。一方、神奈川県三浦半島西岸に位置し、長さ約 1.4 km のポケットビーチである神奈川県秋谷海岸では、現地海岸の底質粒径  $d_{50}=0.1\sim0.3$  mm に対し、50~150 倍の 15 mm の大礫を用いた約 4 万  $m^3$  の養浜が行われた<sup>1)</sup>。養浜前後の海岸状

況の変化を **Fig. 4.2.2** に示す。2005 年 5 月は前浜がほとんどなかったが、2010 年 6 月では養浜によって大きく前浜が広がった。復元された海浜は、その後も流失することなく安定的に維持されているが、大礫のみによる養浜であったために、前浜勾配が約 1/2.5 と非常に急となった。これらの事例のように、粗粒材を用いた養浜は、粗粒材が汀線付近に歩留ることから効果的に前浜を拡幅し、海岸保全に有効であるが、分級を必要とすることから養浜材のコストが高く、養浜材の調達の問題がある。また、この方法では、沖合の緩斜面を構成する砂の供給がないため、一方向沿岸漂砂が卓越する海岸においては、沖合の砂が沿岸漂砂により次第に下手側へ運び去られ、時間経過とともに海浜縦断形の急勾配化が免れ得ない。結果、急勾配海岸へ変化することでの防護機能の低下、漁業（しらす漁や地引網）への影響、さらにバーの消失を招くのでサーフィンなどの利用面にも影響を与える。したがって、**2.3** で述べたように、砂浜による海岸保全は、前浜だけでなく沖浜も含めて海岸全域の保全を図る必要がある、これには粗粒材だけでなく、沖浜を構成する細粒材も重要である。

粒径毎の土砂動態について、茅ヶ崎中海岸において、高波浪が来襲する夏季 2 ヶ月間に 3 粒径 ( $d_{50}=0.2, 2, 10 \text{ mm}$ ) のトレーサの移動状況が調べられた<sup>36)</sup>。トレーサは海岸中央部の汀線と水深 4 m に投入された。ここで、茅ヶ崎中海岸は、海岸中央部の浜幅が最も狭い侵食域では、汀線付近に一部粒径が 10 mm 程度の中礫が存在し、水深の増加とともに粒径は急激に小さくなり、-4 m で  $d_{50}=0.3 \text{ mm}$ 、-8 m で  $d_{50}=0.2 \text{ mm}$  となる。粒径は沿岸方向にも分級し、ヘッドランドや茅ヶ崎漁港の防波堤による波の遮蔽域では 0.2 mm 程度の細砂が浅い水深帯にも分布している。また、この海岸の波による地形変化の限界水深  $h_c$  はほぼ 9 m にある<sup>7)</sup>。調査期間中は台風 4, 7, 8, 10, 12 号の高波浪の影響により、年数回波程度の波浪が 4 回来襲した。**Fig. 4.2.3, 4.2.4** は  $d_{50}=0.2, 2, 10 \text{ mm}$  のトレーサを汀線と水深 4 m に投入後、トレーサが検出された範囲を示す。0.2 mm のトレーサはいずれも時間経過とともに沖合に広く拡散し、一部は HL の沖を越えて下手側海岸へ、一部は茅ヶ崎漁港の港口付近に堆積した。一方、水深 4 m に投入した 2 mm のトレーサは、高波浪を受けて拡散するものの最終的には汀線付近に集中し、また汀線に投入した 2 mm のトレーサは汀線付近に留まった。10 mm の場合は、水深 4 m に投入したトレーサは陸に向かって動き、汀線に投入したトレーサはほとんど動かず投入地点に留まった。なお、2 mm と 10 mm のトレーサは、沿岸方向の移動範囲が異なり、粒径が大きいほど移動範囲が狭いことが確認された。トレーサ調査の結果より、0.2 mm 程度の細粒材は沖合の保全に効果的で、また漂砂下手側海岸への供給材料となることから漂砂系の海岸保全としても有効であることが明らかである。一方、2 mm 以上の粗粒材は、目標浜幅の確保や護岸の根固め等、前浜の保全に効果的であることが明らかである。なお、漂砂調査の後、同海岸では、海岸中央付近で粗い粒径を多く含む試験養浜 ( $d_{50}=2.6 \text{ mm}$ 、

9,856 m<sup>3</sup>) が行われ、**Fig. 4.2.5** に示すように前浜が拡幅し、投入礫は汀線付近に集中的に堆積したことが確認された<sup>36)</sup>。

以上のことから、海岸保全に効果的で、経済的に優れた養浜手法は、粗粒分と細粒分が混合された養浜材で実施することが最適と考えられ、これには流砂系のダムや河川の堆砂をそのまま活用でき、結果、コスト縮減を図ることができる。防護だけでなく環境や利用にも配慮する本手法は、改正された海岸法の趣旨にも合致する。本手法の概念を **Fig. 4.2.6** に示す。なお、流砂系の浚渫材をそのまま活用しても一定の海岸保全効果は得られるが（シルトを除く）、より効果的な養浜材の粒度組成は、対象海岸を構成する砂礫の組成比と同程度が望ましい。しかし、この材料では、砂浜を維持するために沿岸漂砂と同量の養浜を継続しなければならない。したがって、流砂系の浚渫材を用いるとしても、限られた予算で防護機能の早期発現を図るために、予め養浜材の適正範囲を明らかにし、浚渫材による保全効果を十分理解した上で養浜事業を進める必要がある。

(a) Sep. 2002 before beach nourishment



(b) May 2009 after beach nourishment



Photo by Takaaki Uda

**Fig. 4.2.1** Beach change before and after beach nourishment on Jinkouji coast.<sup>1)</sup>

(a) May 2005 before beach nourishment



Photo by Kanagawa prefecture

(b) June 2010 after beach nourishment



**Fig. 4.2.2** Beach change before and after beach nourishment on Akiya coast.<sup>1)</sup>



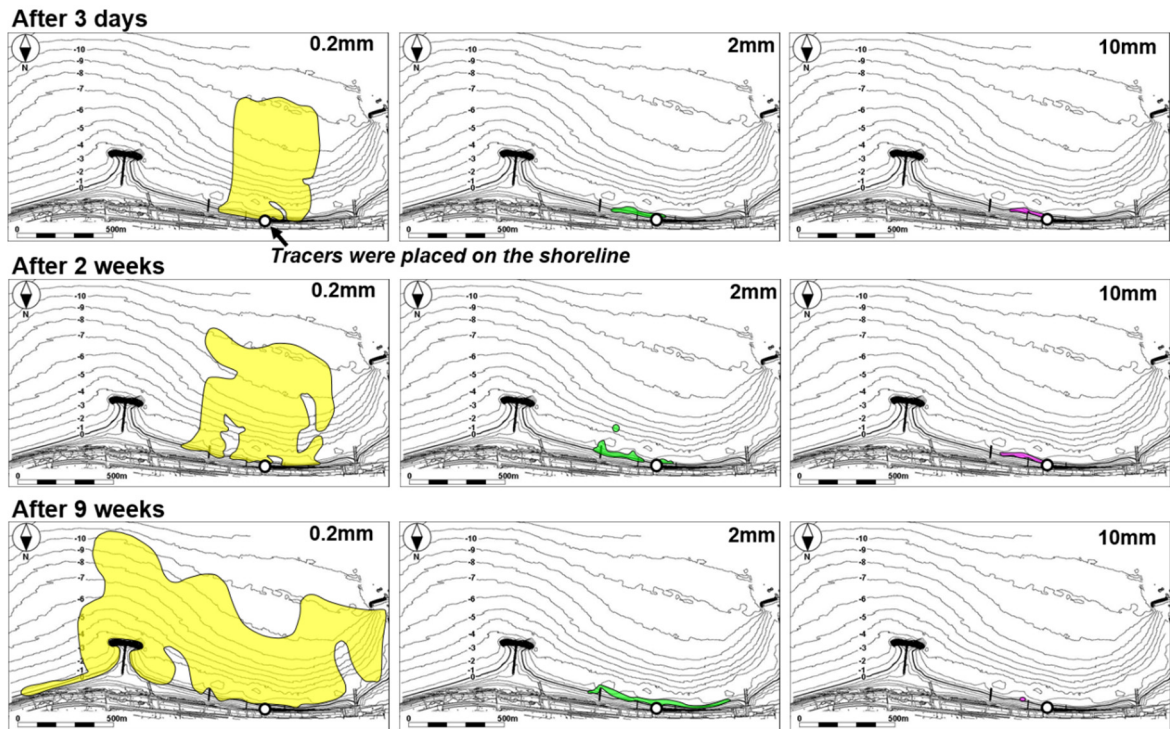


Fig. 4.2.3 Dispersion of tracer sand placed on shoreline.<sup>6)</sup>

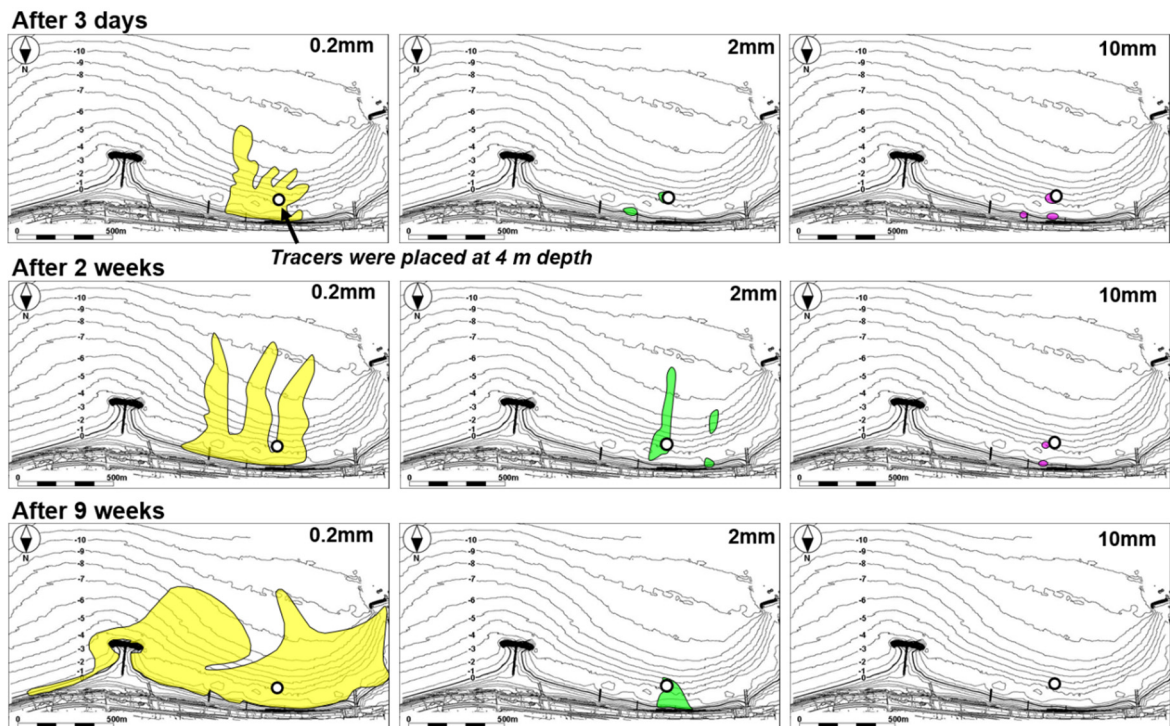


Fig. 4.2.4 Dispersion of tracer sand placed on 4 m depth.<sup>6)</sup>

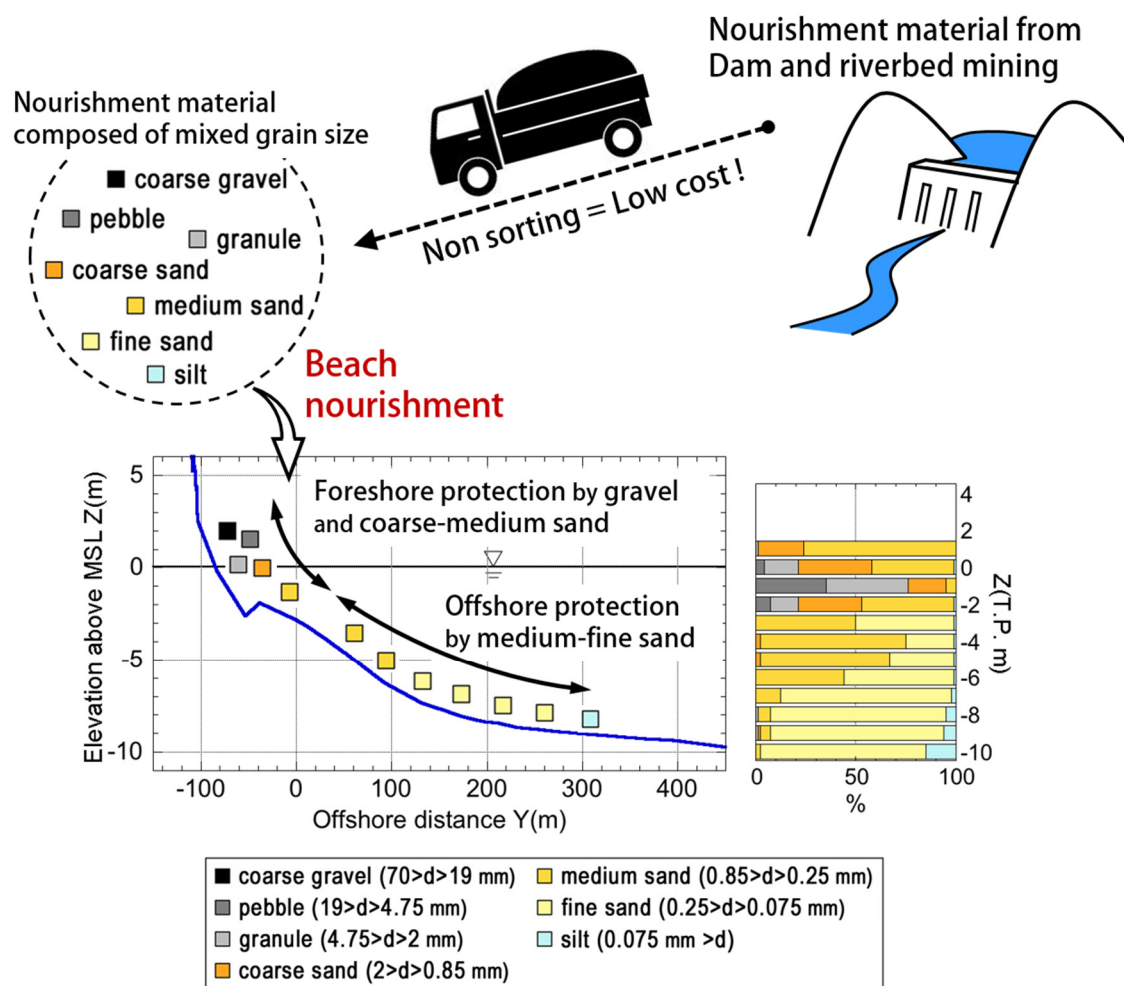
(a) Aug. 2005 before beach nourishment



(b) March 2006 after beach nourishment



**Fig. 4.2.5** Beach change before and after beach nourishment on Chigasaki coast.



**Fig. 4.2.6** Concept of new beach nourishment method.

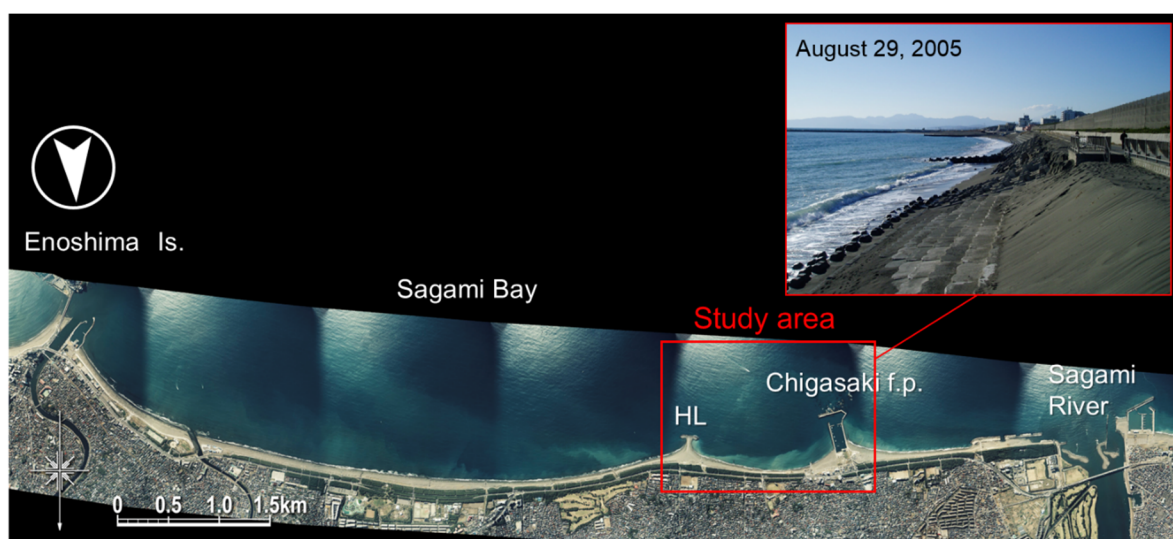


### 4.3. 新たな養浜手法の検討（茅ヶ崎中海岸の例）

限られた予算で防護機能の早期発現を図るためには、予め養浜材の適正範囲を明らかにし、流砂系から調達する材料の保全効果を十分理解した上で養浜事業を進める必要がある。そこで、**Fig. 4.3.1** に示す茅ヶ崎中海岸を対象に、養浜材の適正範囲まで示した新たな養浜手法の検討例<sup>23)</sup>を以下に示す。この海岸では、相模川からの供給土砂の激減と茅ヶ崎漁港防波堤の建設に伴う東向きの沿岸漂砂の阻止により、2005 年までに著しく侵食し、既設護岸が被災するなどの被害が出た。このため何らかの侵食対策が必要とされたが、漁業や釣り、サーフィンなどの海岸利用が盛んなことから、**4.2** で述べた養浜手法により、防護だけでなく海岸利用にも有効な沖浜も含めた海岸全域の保全が適切と考えられた。

#### (1) 検討方法

海岸全域の保全に効果的な養浜材の適正範囲を明らかにするためには、粒径変化を考慮した海浜変形の時空間的变化を予測可能な地形変化予測モデルにより検討を行う。まず、ヘッドランド建設後の 1991 年～2005 年までの地形変化を再現し、地形変化予測モデルを構築する。この場合、茅ヶ崎漁港を越えて漂砂上手側からの土砂供給はほぼゼロであること、ヘッドランドを越えて下手側へ流出する漂砂は約  $4,600 \text{ m}^3/\text{yr}$  であること<sup>7)</sup>、2005 年までに少量の養浜が行われていることなどを考慮する。次に、このモデルを用いて、実際に相模ダムに堆砂している土砂の粒度組成を参考に、養浜材の粒度組成を様々変えた場合の地形変化を予測し、前浜だけでなく沖浜も含めて海岸全域の保全を図ることが可能な適切な養浜材の粒度組成を明らかにする。



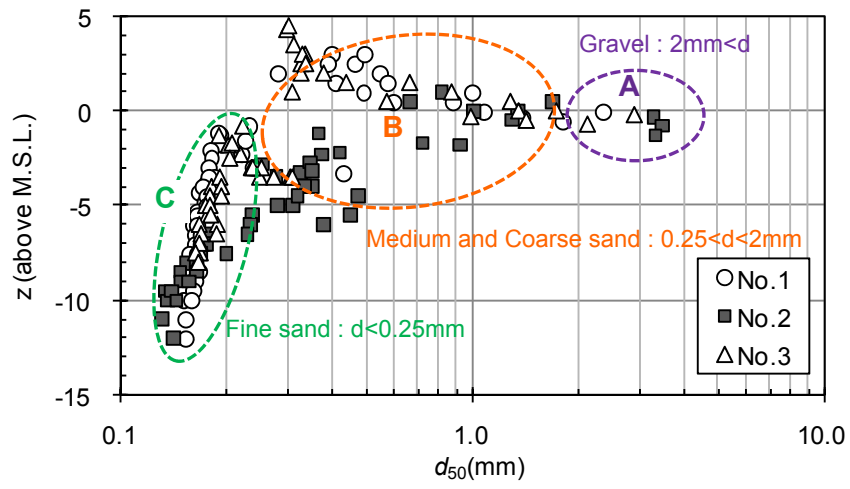
**Fig. 4.3.1** Location of study area (Chigasaki coast) in Sagami Bay.

## (2)計算モデル

混合粒径の養浜材による地形変化を予測するため、地形変化予測モデルには粒径を考慮した等深線変化モデル<sup>8)</sup>を用いる。このモデルは、前浜では粗な粒径が集まって急勾配、沖浜では細い粒径が集積して緩勾配を形成するといった現地海岸の特徴を考慮し、粒径集団毎に平衡勾配を設定し、各粒径の動きやすさは粒径毎に設定できることから、水深方向に様々な粒径の砂礫が分布している海岸の地形変化、粒径変化の予測が可能であり、また、養浜材の粒径毎の広がり予測することが可能である。

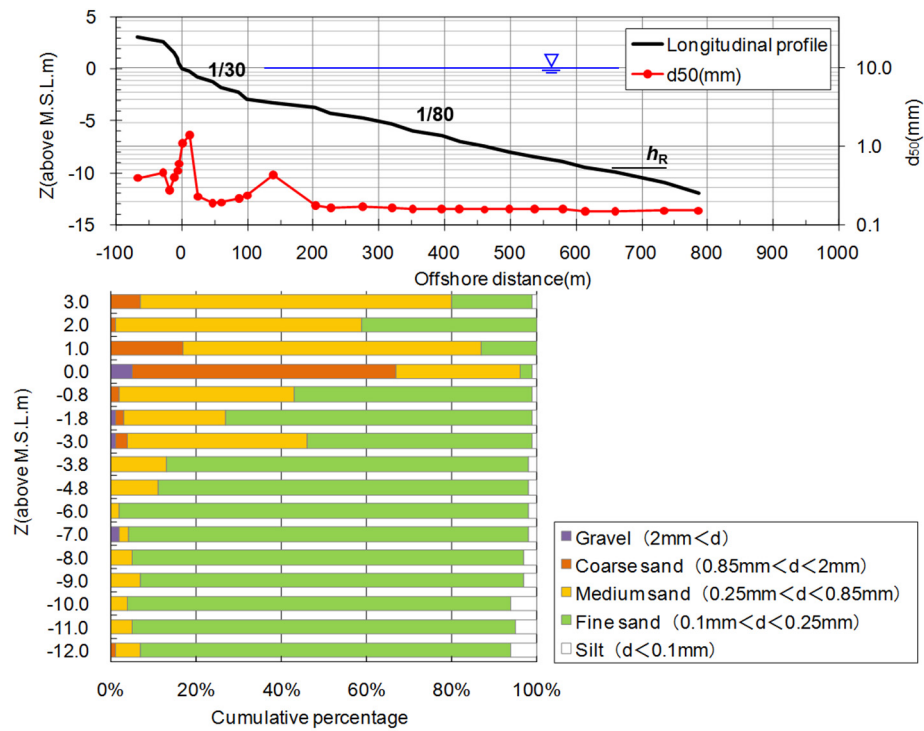
## (3)計算条件

計算モデルの座標系は実座標とし、沖合にある岩礁帯による波浪減衰効果を考慮することで再現性を高める。入射波は平塚沖の観測データより算出したエネルギー平均波 ( $H_b=0.83$  m,  $T=6.35$  s) とし、波向は再現計算より同定する。地形変化の水深範囲は、実測の深浅図よりバーム高  $h_R=3$  m から波による地形変化の限界水深  $h_c=-9$  m までとする。粒径条件は実測データより設定する。**Fig. 4.3.2** は茅ヶ崎中海岸の  $d_{50}$  の水深分布である。勾配が変化する汀線  $\sim -1$  m 付近を境に、陸側の粗い粒径で構成される集団 A と、 $-3$  m 付近までの  $0.15\sim 0.4$  mm の中砂集団 B、 $-3$  m 付近から  $h_c$  へと徐々に小さくなる  $0.2$  mm 以下の細砂集団 C にほぼ区分される。**Fig. 4.3.3** は海岸中央の侵食域と HL 近傍の波の遮蔽域における縦断形と  $d_{50}$  の岸沖方向分布、粒径含有率の水深分布である。これより、底質は主に細砂 ( $0.1\sim 0.25$  mm) と中砂・粗砂 ( $0.25\sim 2$  mm) の 2 成分で構成され、汀線 ( $0$  m)  $\sim -1$  m 付近に礫が多く出現する。以上を考慮し、計算では 3 つのレンジ (細砂以下:  $\sim 0.25$  mm, 中砂・粗砂:  $0.25\sim 2$  mm, 細礫以上:  $2$  mm $\sim$ ) を粒径集団とし、これら粒径集団に対応する平衡勾配は、**Fig. 4.3.3** より、各粒径集団で代表される水深帯毎の海底勾配を参考に、それぞれ細砂:  $1/80$ , 中砂・粗砂:  $1/30$ , 細礫以上:  $1/10$  とする。粒径の初期含有率は、再現計算では、 $d_{50}$  の水深方向分布を底面長で加重平均して各粒径の存在率を求め、さらにそれらを上記 3 レンジに再区分することによって得られた含有率とする。一方、将来予測計算の養浜材は、**Fig. 4.3.4** に示すように中海岸の現地底質のほかに、相模ダムの浚渫材の実測値より、粗粒材 (細砂: 中砂粗砂: 礫 =  $0.1 : 0.23 : 0.67$ ) , 細粒材 ( $0.90 : 0.05 : 0.05$ ) の 3 種類の含有率とする。計算条件を **Table 4.3.1** に示す。

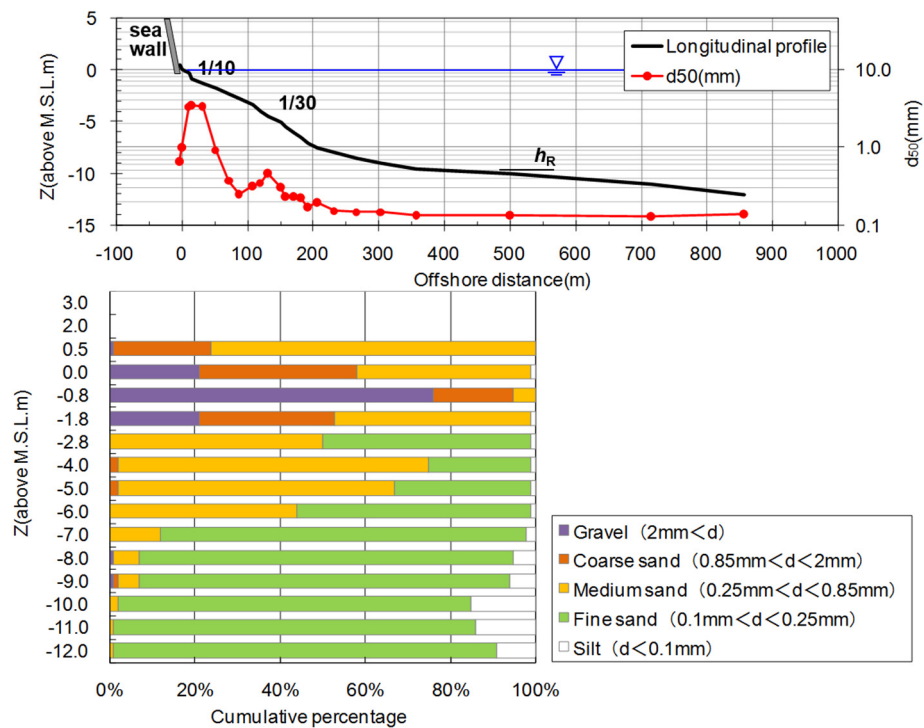


**Fig. 4.3.2** Depth distribution of  $d_{50}$ . <sup>3)</sup>

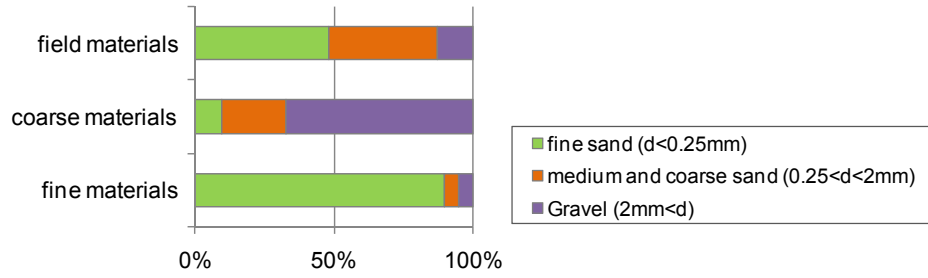
(a) No.11



(b) No.18



**Fig. 4.3.3** Longitudinal profiles, cross-shore distributions of  $d_{50}$  and content of grain sizes of bed materials.<sup>3)</sup>



**Fig. 4.3.4** Contents of nourishment sand. <sup>3)</sup>

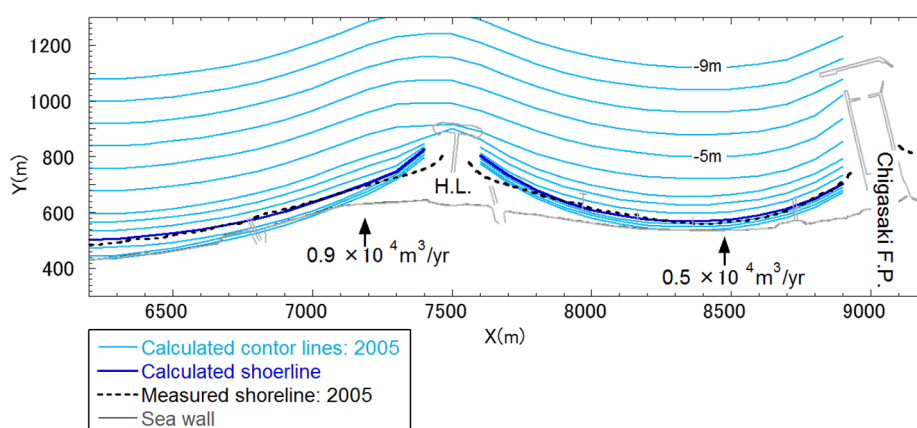
**Table 4.3.1** Calculation conditions

Coordinate system	Cartesian coordinates considering actual seabed topography
Initial topography	Parallel, straight contour lines
Wave conditions	Energy-mean significant wave Breaker height: $H_b=0.83$ m, $T=6.4$ s, wave direction=S6°W
Water level	Mean sea level
Depth of closure and Berm height	$h_c=9$ m, $h_R=3$ m
Grain size conditions	Grain size populations: Grain size 1: fine sand with the grain size less than 0.25 mm Grain size 2: coarse and medium sand with grain size between 0.25 mm and 2 mm Grain size 3: gravels with grain size larger than 2 mm Equilibrium slope and thickness of exchange layer: Grain size 1: 1/80 and 0.625 m, Grain size 2: 1/30 and 1.667 m Grain size 3: 1/10 and 5 m Content ratios for reproduction calculation: $\mu_1=0.48$ (Grain size 1), $\mu_2=0.39$ (Grain size 2) $\mu_3=0.13$ (Grain size 3) Content ratios for prediction (Nourishment conditions): $\mu_1=0.48$ , $\mu_2=0.39$ , $\mu_3=0.13$ (for present materials) $\mu_1=0.10$ , $\mu_2=0.23$ , $\mu_3=0.67$ (for coarse materials) $\mu_1=0.90$ , $\mu_2=0.05$ , $\mu_3=0.05$ (for fine materials)
Coefficients of sand transport	Coefficient of longshore sand transport: $K_x=0.387/\sqrt{d_{50}}$ Grain size 1: $K_x=0.1000$ , Grain size 2: $K_x=0.0866$ Grain size 3: $K_x=0.0274$ Coefficient of cross-shore sand transport: $K_z=0.4K_x$ Ozasa and Brampton coefficient: $K_2=1.62K_z$
Depth distribution of sand transport rate	Cubic equation given by Uda and Kawano (1996)
Critical slope	1/2 on land and 1/3 on seabed
Calculation domain	$z=+3$ to $-9$ m
Mesh size	$\Delta x=100$ m and $\Delta z=1$ m
Time interval	$\Delta t=50$ hrs, 180 steps /yr
Calculation period	From 1991 for reproduction and 10 years for prediction
Boundary conditions	Left boundary : Reproduction $Q_{in}=0$ m <sup>3</sup> /yr After measures $Q_{in}=0$ m <sup>3</sup> /yr Right boundary : $Q_{in}=1.4 \times 10^4$ m <sup>3</sup> /yr Landward and offshore boundaries : $q_z=0$
Calculation method	Explicit finite difference method

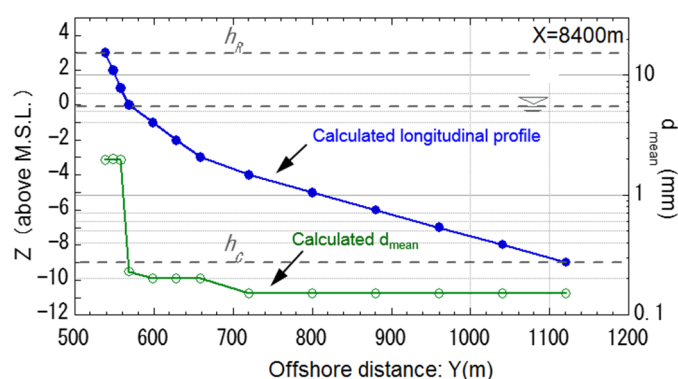
#### (4)再現計算

ヘッドランド建設後の1991年～2005年までの地形変化の再現計算結果を **Fig. 4.3.5, 4.3.6** に示す。現地海岸では、1991年以降、維持養浜により汀線や地形に大きな変化が見られない動的平衡状態に達しているが、再現計算はこの動的平衡状態を再現できている。また、この動的平衡状態は、 $0.5 \text{ 万 m}^3/\text{yr}$  の土砂供給により再現できたことから、土砂収支も実態と整合が取れている。さらに2005年の汀線形状やHL沖の-5 m以深における等深線の蛇行、および急勾配の汀線付近から沖に向かって緩い勾配へ変化する縦断形（等深線）など、対象海岸の地形をよく再現できている。一方、陸上部の+1 m以上では粒径2 mmの礫が集中的に堆積し、汀線から-3 mまではほとんどが0.2 mmの砂で、さらにその沖は0.15 mmの砂で覆われている。このように粗粒材が多くを占める汀線付近から沖に向かって細粒へ変化する縦断方向の底質分級の特徴も再現できている。

このように、対象海岸の地形的特徴や地形変化、底質特性は、粒径を考慮した等深線変化モデル<sup>8)</sup>により再現することができる。



**Fig. 4.3.6** Reproduced contour lines and comparison of measured and predicted shoreline configurations.<sup>3)</sup>



**Fig. 4.3.7** Predicted longitudinal profile and cross-shore distribution of mean grain size.<sup>3)</sup>

## (5)将来予測計算

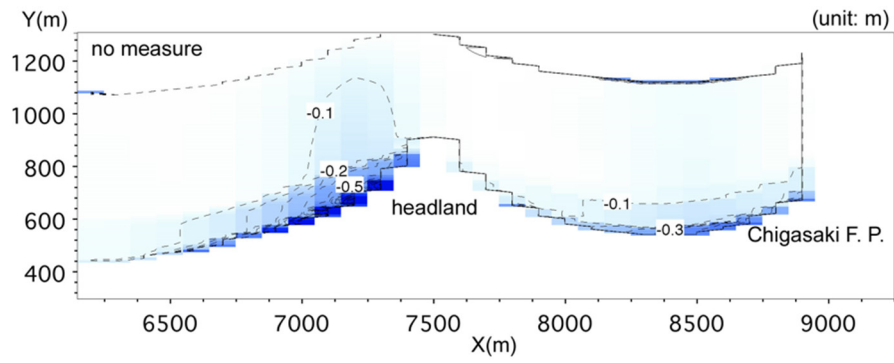
構築したモデルを用いて、**Fig. 4.3.4** に示した養浜材を用いた場合の 10 年後の地形変化、底質変化を予測する。養浜材の投入範囲は海岸中央部 ( $X=8400\sim 8600$  m) とし、養浜量は **3.4** で得た結果より 3 万  $\text{m}^3/\text{yr}$  とした。この量を海岸に投入するには 3 か月程度の期間を要し、年間を通じて利用者の多い湘南海岸での施工条件として妥当な養浜量でもある。

2005 年に対する水深変化量の平面分布を **Fig. 4.3.8** に、汀線変化量を **Fig. 4.3.9** に示す。また海岸中央部の海浜縦断形と平均粒径の変化を **Fig. 4.3.10** に示す。養浜を行わず放置した場合 (Case 1)，侵食が進み、汀線後退だけでなく沖合の地盤高も低下する。礫が 70%程度含まれる粗粒材養浜の場合 (Case 2) は、養浜材は汀線付近に著しく堆積し、さらに沖合も含めた広い範囲で堆積する。汀線前進量は最大 35 m となり、1954 年当時の汀線に近いレベルまで汀線を前進させることができる。海浜縦断形は沖向きにほぼ平行移動し、汀線付近では最大 3.5 m の地盤高の上昇がみられ、その部分は主として 2 mm の礫で構成される。このように汀線付近に粗粒材が集中的に堆積する結果は、**Fig. 4.2.1, 4.2.2** に示した現地実験で得られた結果と一致する。これに対し、細砂が 90%程度含まれる細粒材養浜の場合 (Case 3) は、粗粒材と異なり汀線付近での堆積はあまり生じることがなく、養浜材は主に沖合で堆積し、沖合の地盤高の上昇量は粗粒材よりも大きい。縦断形の変化からも汀線の前進量はわずかであって、投入した細砂は水深の大きい場所へと移動したことが分かる。このように、大量の細砂の供給は主に沖合の海岸保全に効果的である。一方、養浜材の含有率を現地海岸と同一とした場合 (Case 4) は、粗粒材 (Case 2) に比べて前浜の保全効果は低いものの、沖合の地盤高上昇量は大きい。

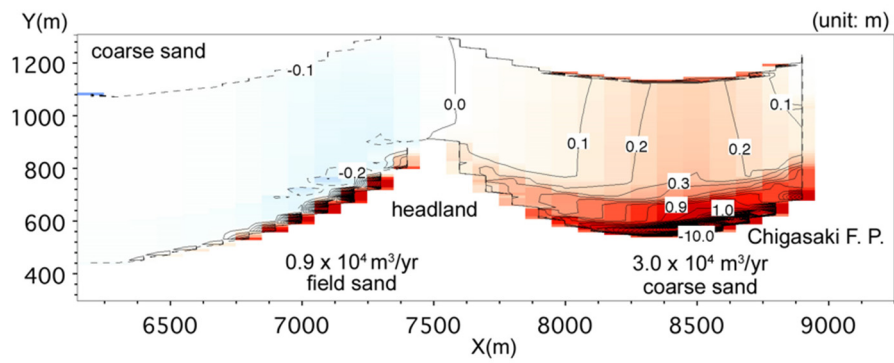
以上のことから、養浜量 3 万  $\text{m}^3/\text{yr}$  の条件では、現地海岸の粒径と同程度の養浜材や粗粒材を多く含む養浜材であれば、前浜だけでなく沖浜も含めて海岸全域の保全に効果的であるといえる。



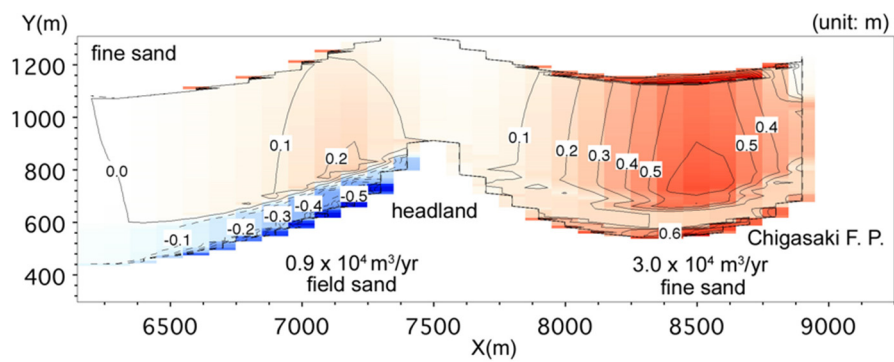
Case 1 No measure



Case 2 Coarse materials



Case 3 Fine materials



Case 4 Field materials

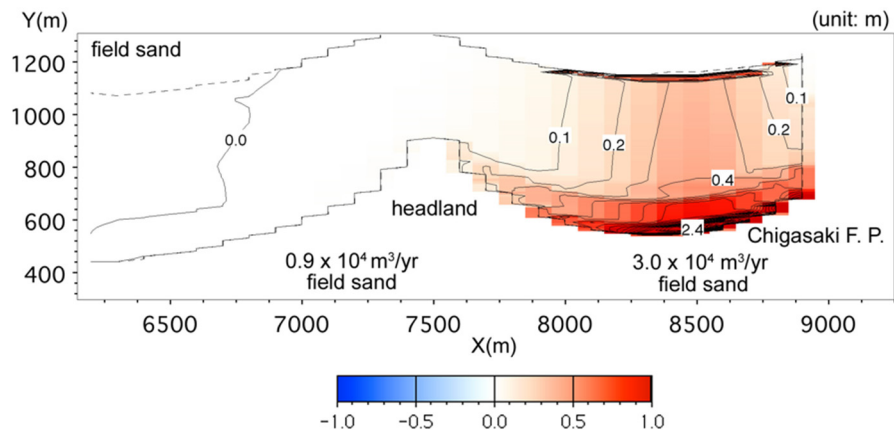
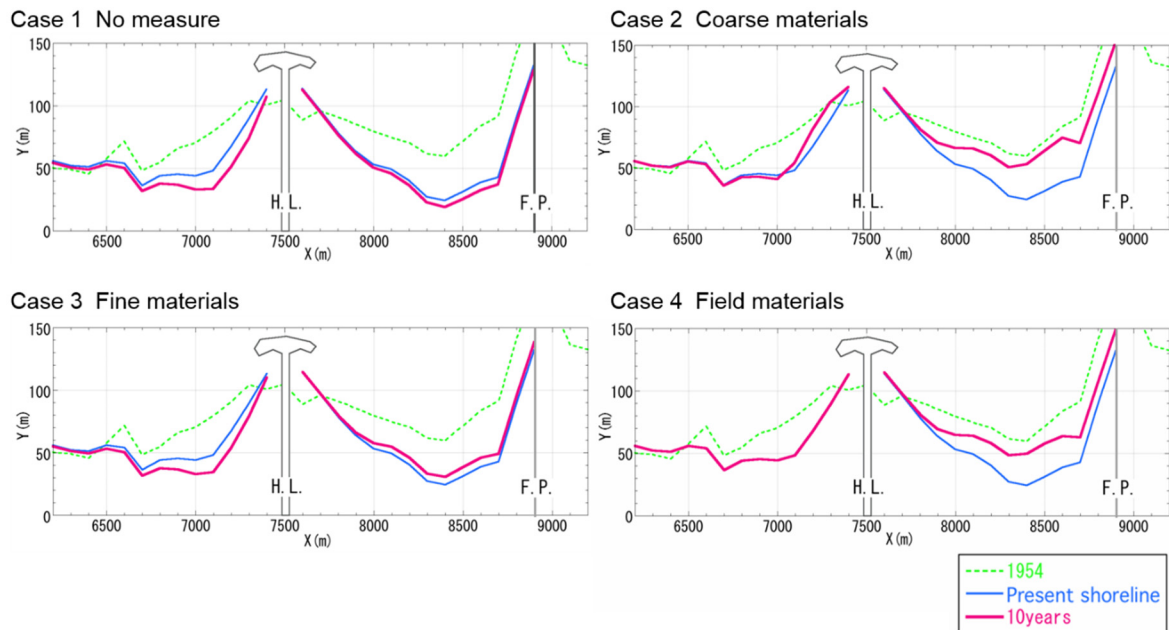
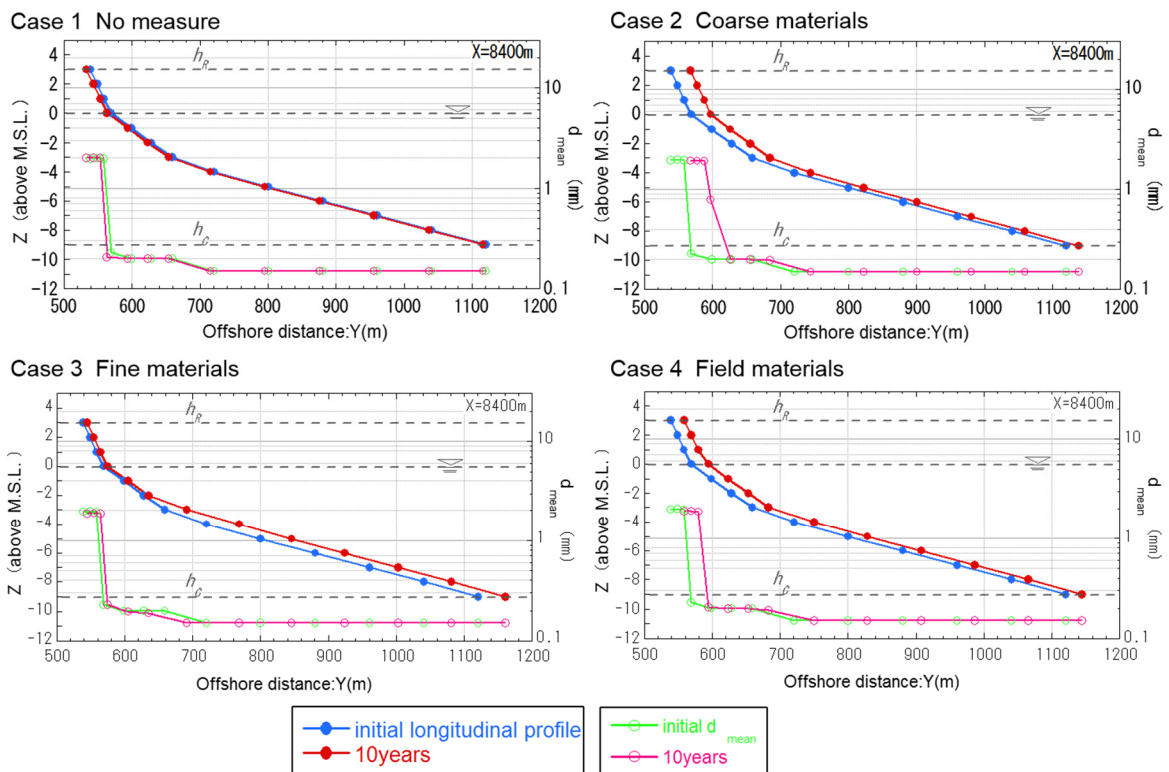


Fig. 4.3.8 Bathymetric changes relative to initial beach topography in four cases. <sup>3)</sup>



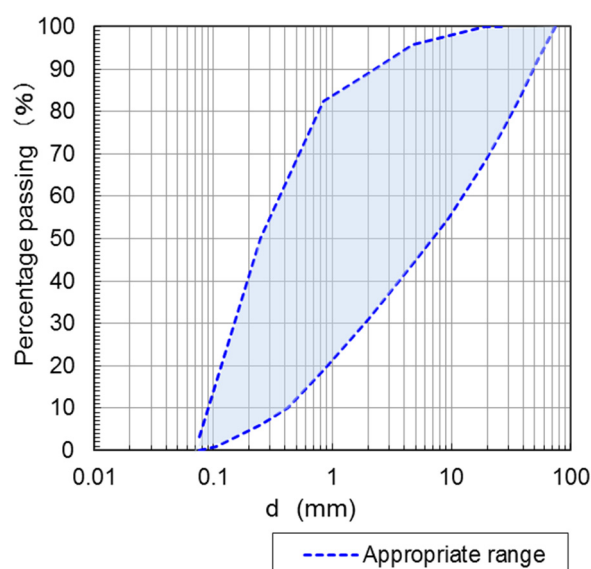
**Fig. 4.3.9** Comparison of shoreline changes in four cases. <sup>3)</sup>



**Fig. 4.3.10** Change in longitudinal profile and mean grain size along centerline of pocket beach. <sup>3)</sup>

## (6)養浜材の適正範囲

海岸利用が盛んな茅ヶ崎中海岸では、前浜の保全だけでなく、漁業やサーフィンなどの利用面・環境面にも配慮し、過去の遠浅な海岸を目指して前浜から沖浜までの保全を図り、汀線付近に歩留まる粗粒砂と細粒砂が混じった養浜砂を投入することが望ましい。具体的な養浜材の条件は、防護上必要な浜幅の確保や護岸の根固め機能として、直接的に汀線付近を防護する  $d_{50}=2\text{ mm}$  以上の礫と、沖浜を構成する細砂・中砂の混合材料とし、数値計算により様々な検討した結果、年間の養浜量 3 万  $\text{m}^3/\text{yr}$  の条件で早期に防護機能を発現するための適正範囲は **Fig. 4.3.11** に示すように提案できる。養浜の実施にあたっては、流砂系から調達した養浜材に対し、この適正範囲内であるかを予めチェックし、必要に応じてストック材とブレンドすることによって、養浜による保全効果を調整すれば良い。なお、この適正範囲は、養浜後のモニタリングによって、必要に応じて適宜見直す必要がある。養浜材の投入方法は、浜幅の狭い海岸中央部に養浜材を集中投入し、周辺海岸への影響を軽減するためにも、波の作用で自然拡散を期待する盛土形状で良い。また、投入時期は、海水浴場開設期間や漁業の繁忙期を外すなど、利用者に配慮した時期として 1 月～3 月が適切と考えられる。



**Fig. 4.3.11** Example of appropriate range for beach nourishment materials.

#### 4.4. 新たな養浜手法の海岸保全効果（茅ヶ崎中海岸の例）

茅ヶ崎中海岸では、最も汀線が後退した海岸中央部の砂浜幅を 10 年間で防災上必要な 50 m まで回復させることを目的に、さらに前浜から沖浜まで海岸全域の保全を図ることを目指して、主に相模ダムの浚渫土砂を有効活用した混合粒径土砂による年間 3 万  $\text{m}^3$  の養浜が 2006 年より実施され、2011 年 3 月までに計画量の約 1/2 (16.2 万  $\text{m}^3$ ) の養浜材が投入された。この結果、海浜が大きく回復した (**Fig. 4.4.1**)。4.4 では、高波浪時における海浜安定性や短期的な地形変化にも注目して、養浜後の地形変化 <sup>4)5)9)10)</sup>より、新たな養浜手法の妥当性を評価した。

(a) Aug. 2005 before beach nourishment



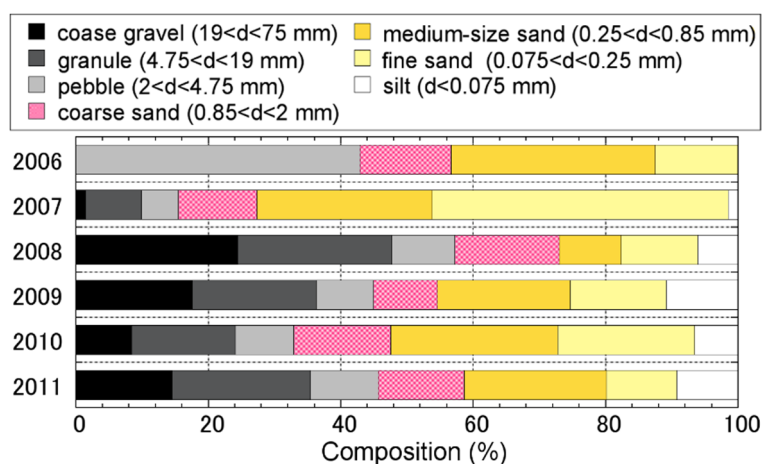
(b) Sep. 2011 after beach nourishment



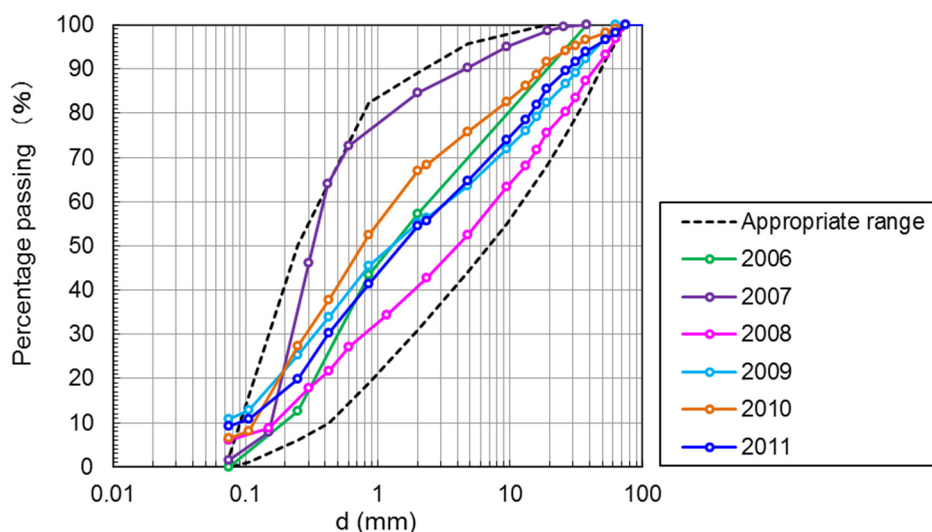
**Fig. 4.4.1** Foreshore changes on Chigasaki coast between August 29, 2005 and September 25, 2011 before and after beach nourishment, respectively. <sup>5)</sup>

## (1) 養浜実績

茅ヶ崎中海岸では、2006 年から 2011 年までに計 16.2 万  $\text{m}^3$  の養浜が行われた。養浜には、養浜材の適正範囲内になるよう、主に相模ダムの浚渫土砂、茅ヶ崎漁港西側の堆積砂をブレンドした養浜材が用いられ、**Fig. 4.4.2** に示すように礫を多く含むが、すべて **Fig. 4.4.3** に示すように適正範囲内の養浜材が投入された。養浜方法は、浜幅が最も狭い海岸中央付近で盛土状（延長  $L=400$  m）に土砂を集中投入し、波の力により周辺海岸に自然に供給される動的養浜手法が用いられた。



**Fig. 4.4.2** Composition of nourishment materials. <sup>5)</sup>



**Fig. 4.4.3** Comparison of nourishment materials with appropriate range. <sup>5)</sup>

## (2) 波浪条件

茅ヶ崎中海岸から西へ約 4 km 離れた平塚における 2005 年 1 月 1 日～2011 年 12 月 31 日の波浪観測結果を **Fig. 4.4.4** に示す。期間中には、各年の最大有義波高の平均値  $H_{1/3}=4.5$  m



を越える高波浪の継続時間が観測史上最長(17h)であった 2007 年 9 月の台風 9 号( $H_{1/3}=6.1$  m,  $T_{1/3}=10.1$  s), 観測史上最大有義波を記録した 2009 年 10 月の台風 18 号( $H_{1/3}=6.5$  m,  $T_{1/3}=10.4$  s, 高波浪の継続時間 5h), そして 2011 年の台風 6, 12, 15 号に伴う高波浪が作用した. 2011 年の台風 15 号襲来時の高波浪は欠測のため最大波高が観測されていないが, 伊豆半島先端に位置するナウファス石廊崎では観測史上最大の有義波( $H_{1/3}=10.6$  m,  $T_{1/3}=12.8$  s)を記録した. この影響で小田原海岸では後浜高が最大 3.5 m 低下するなど, 湘南, 西湖の各地の海岸で著しい侵食が起きた.

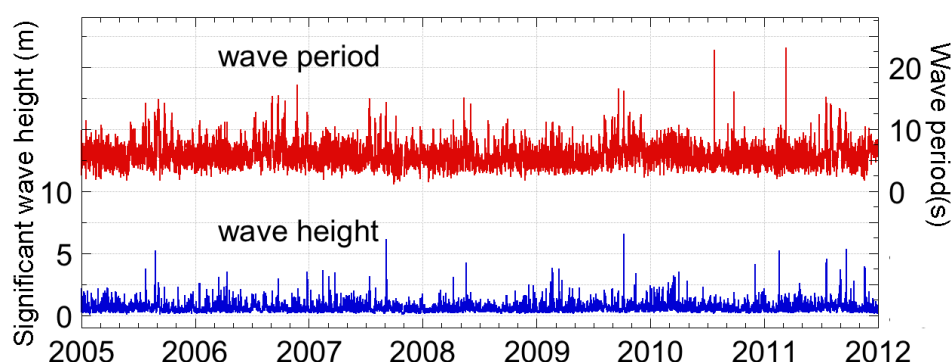


Fig. 4.4.4 Wave conditions between 2005 and 2011 measured at Hiratsuka wave observatory. <sup>5)</sup>

### (3)空中写真比較と汀線変化解析

養浜前の 2005 年 10 月と養浜後の茅ヶ崎中海岸の空中写真を Fig. 4.4.5 に示す. 2005 年 10 月ではヘッドランドと茅ヶ崎漁港間に位置する 1 号突堤付近では前浜が非常に狭く, 白く見える護岸と汀線とがほぼ重なりを示していた. 2006 年には養浜が始まり, 3.2 万  $m^3$  の養浜材が投入された. 2007 年の台風 9 号襲来から 2 ヶ月後の 2007 年 11 月では, 高波浪が作用したにも関わらず 2005 年と比較して主に海岸中央部の汀線が前進した. その 9 ヶ月後の 2008 年 8 月では, 養浜前の 2005 年 10 月の状態と比較して海岸中央部で海浜が大きく広がった. とくに 1 号突堤付近では 2005 年 10 月には護岸が直接波に曝されていたが, 養浜によって護岸前面に前浜が形成されたことが明らかであり, 養浜の効果が顕著に現れた. 計画養浜量の 44 %の 13.1 万  $m^3$  の土砂投入後の 2010 年 5 月では, 砂浜の回復が確実に進んだ. その後計 16.2 万  $m^3$  の土砂投入後の 2011 年 3 月までには砂浜は大きく広がり, 砂浜幅が最も狭い海岸中央部でも 40 m 程度まで回復した. しかし, 台風 15 号襲来後の 2011 年 11 月では 6 号水路が汀線より沖に突出していることから, 汀線がわずかに後退した.

空中写真から汀線位置を計測し, 撮影時刻と深浅測量に基づく前浜勾配から平均潮位 (T.P. $\pm 0$  m) における汀線位置を求め, 2005 年の汀線を基準とした汀線変化量を Fig. 4.4.6 に示す. 2008 年までは海岸中央部のみ汀線が前進する傾向であったが, 2010 年では, ヘッド

ランドから茅ヶ崎漁港間の汀線が全体的に前進しており、汀線の前進区域が沿岸方向に広がった。さらに 2011 年 3 月までに 3 号突堤より西側で堆積が進み、1 号突堤～6 号水路間の 2005 年以降の汀線前進量はほぼ 15 m に達した。一方、台風 15 号襲来後の 2011 年 11 月では、海岸中央付近の汀線はほとんど変化せず、茅ヶ崎漁港側、ヘッドランド側の汀線が後退した。なお、現地踏査や底質調査結果によれば、汀線変化が起こらなかった海岸中央付近の前浜は、礫を多く含む比較的粗い粒径によって構成されていた。

茅ヶ崎漁港～ヘッドランド間の実績養浜量と、2005 年基準での海浜面積増加量の関係を Fig. 4.4.7 に示す。養浜量に比例して海浜面積が増加し、台風 15 号襲来前の 2011 年 3 月までの増加量は約 13,000 m<sup>2</sup> であった。茅ヶ崎中海岸の移動高  $h$  は 10 m<sup>6)</sup> と推定されているので、海浜面積の増加量に移動高を乗じて海浜土砂量の増加量に換算すると、増加土砂量は 13 万 m<sup>3</sup> となる。この値は、実績養浜量 16 万 m<sup>3</sup> から、ヘッドランドを越えて東へ向かう沿岸漂砂量 0.5 万 m<sup>3</sup>/yr<sup>7)</sup> の、期間中の総量 0.5 万 m<sup>3</sup>/yr $\times$ 5 yrs=2.5 万 m<sup>3</sup> を引いた 13.5 万 m<sup>3</sup> とよく対応する。

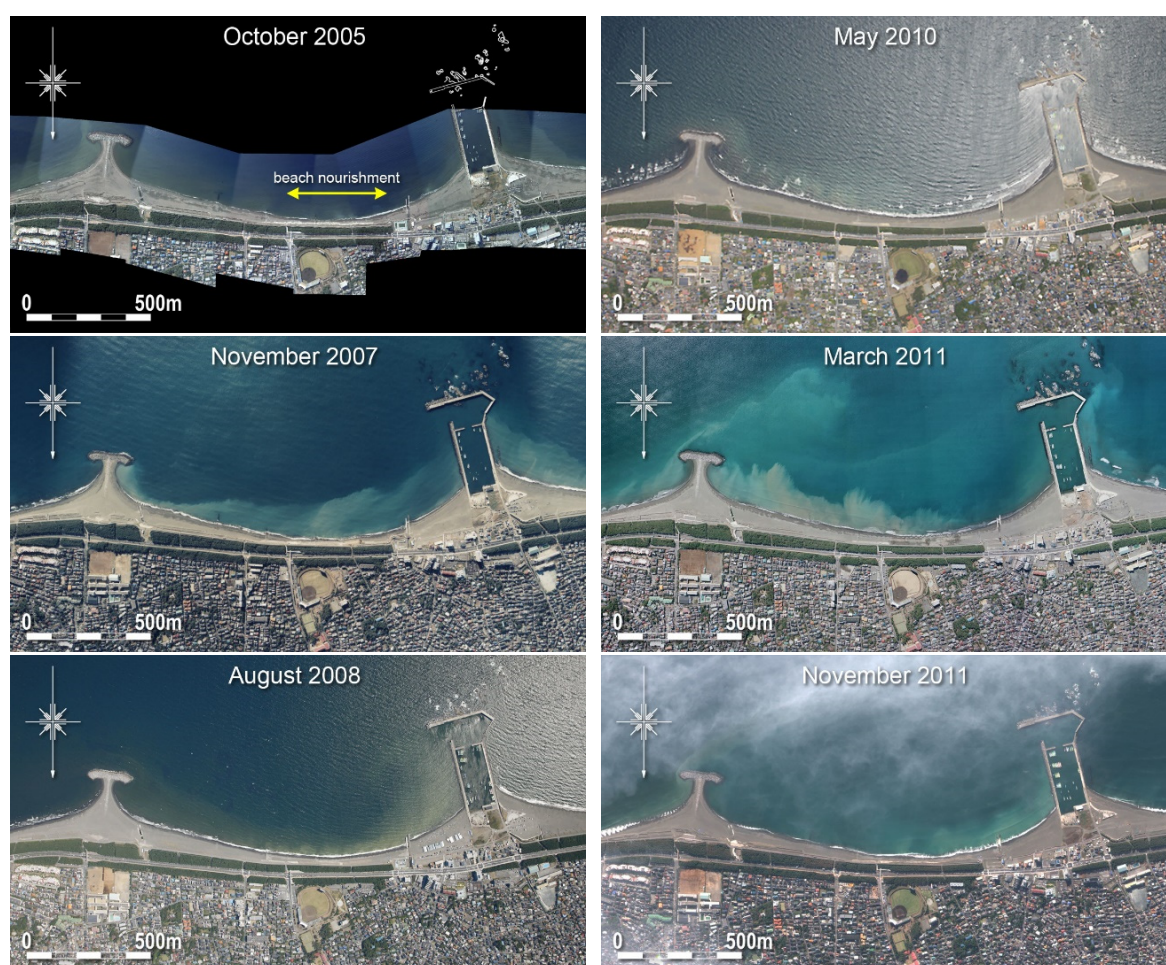


Fig. 4.4.5 Aerial photographs of Chigasaki coast taken between 2005 and 2011. <sup>5)</sup>



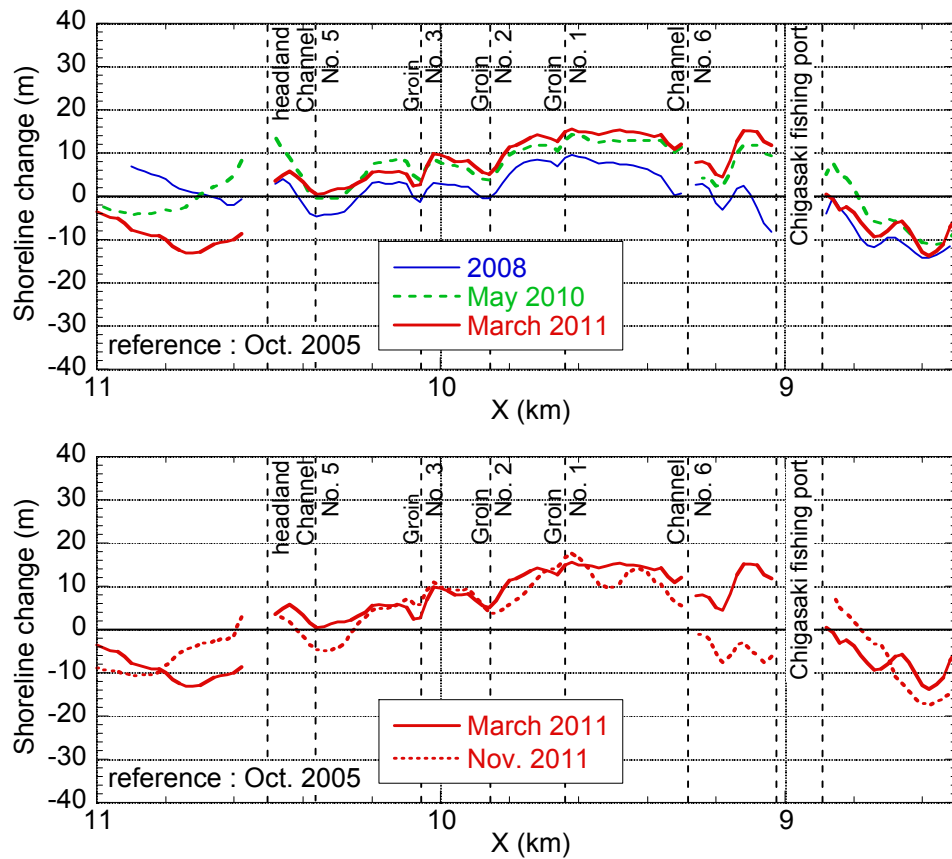


Fig. 4.4.6 Shoreline changes with reference to shoreline in October 2005.<sup>5)</sup>

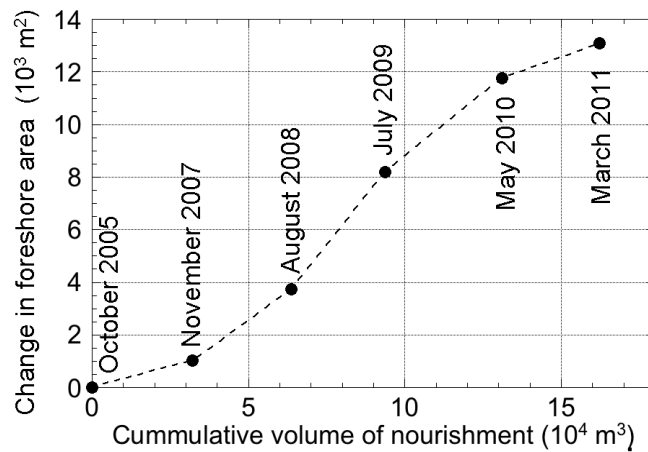


Fig. 4.4.7 Relationship between beach nourishment volume and change in foreshore area in study area between artificial headland and Chigasaki fishing port.<sup>5)</sup>

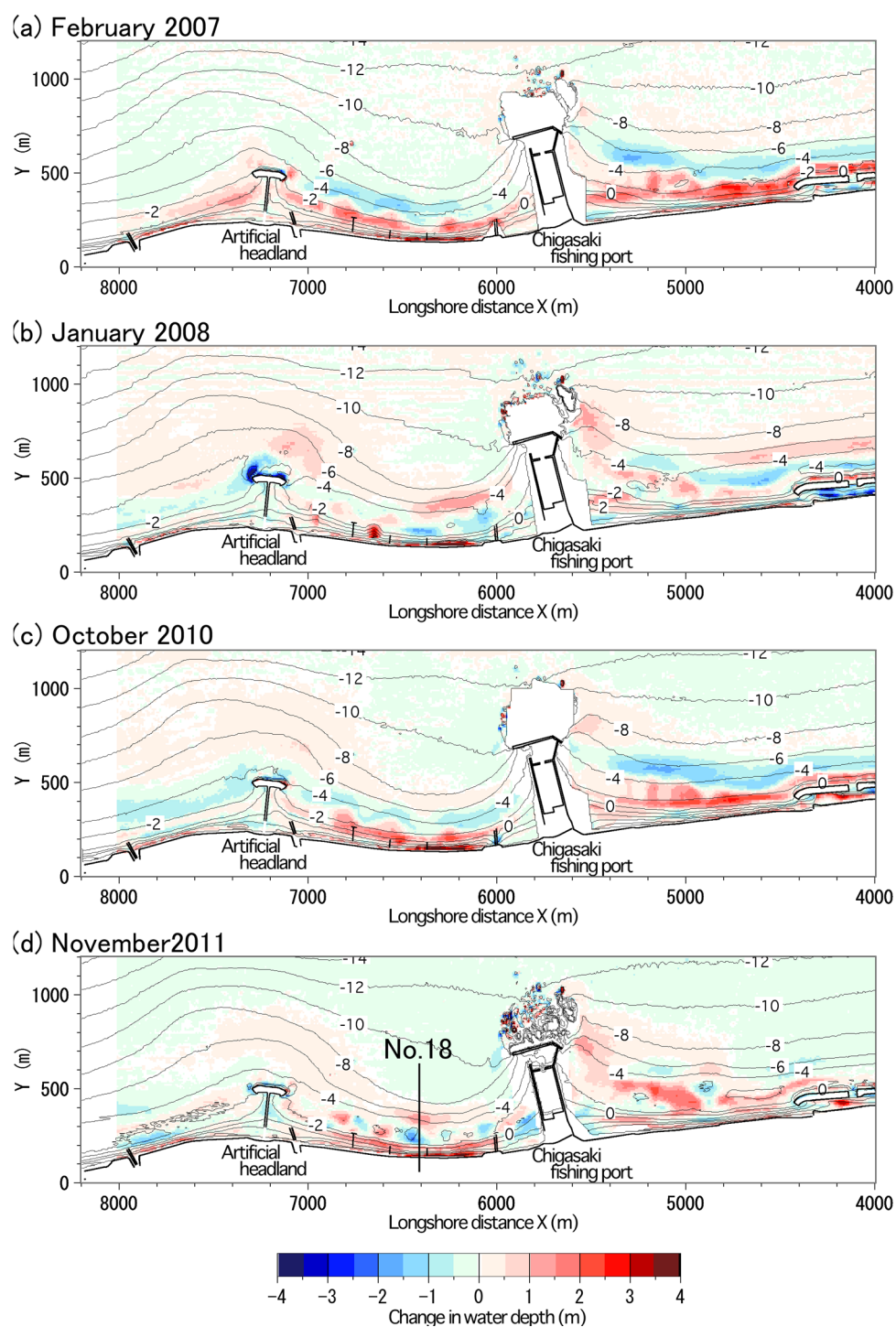
#### (4) 深浅測量データの分析

2005 年の地形を基準とした 2011 年までの 4 時期の地形変化量を Fig. 4.4.8 に示す．前浜を中心に水深 8m 以浅において堆積が進んでおり，継続的な養浜により，前浜だけでなく沖

浜も含めた海岸全域の保全が図られつつある。一方、2007年の台風9号による高波浪作用後の2008年1月では、沖向き漂砂により汀線付近が侵食されて-4 m 付近に堆積し、バー・トラフ地形が形成された。その後2010年10月までには、養浜の効果と同時に、-4 m 付近のバーが削られてその砂が岸向き漂砂により運ばれたため汀線付近が著しく堆積した。しかし2011年11月では、2011年の台風15号による高波浪の作用により再び-3 m 付近にバー・トラフが形成された。Fig. 4.4.9には波の作用を最も強く受け、2005年時点で著しい侵食が起きた海岸中央部の測線 No.18 の縦断形変化を示す。Fig. 4.4.8に見られたように、台風9号による高波浪作用後の2008年1月では、-4 m 以浅が削られて砂が沖向きに移動し、比高1 m のバーが形成された。その後、2011年1月では、養浜により前浜の地盤高が高くなり汀線が前進するとともに、トラフが埋め戻されて水深4 m 以浅が緩勾配化した。2005年に対し汀線は12 m 前進し、浜幅は約40 m である。2011年の台風15号により再びバー・トラフ地形が形成されたが、水深2 m 以浅はほとんど変化していない。

#### (5)底質変化

養浜前後の測線 No.18 の粒度組成の水深分布を Fig. 4.4.10 に示す。度重なる高波浪に対し安定している汀線付近には礫が多く含まれている。また2011年1月では、Fig. 4.4.9に示したように前浜の地盤高が高くなり汀線の前進がみられ、また水深1~3 m が緩勾配化した。前浜は細礫を多く含む礫40%程度の底質で構成され、緩勾配化した水深帯は中砂が65%と多いことが分かる。このように前浜だけでなく沖浜も含めた海岸保全には、礫を多く含む混合粒径材料の養浜が効果的である。



**Fig. 4.4.8** Bathymetric changes between February 2007 and November 2011 with reference to bathymetry in 2005. <sup>5)</sup>

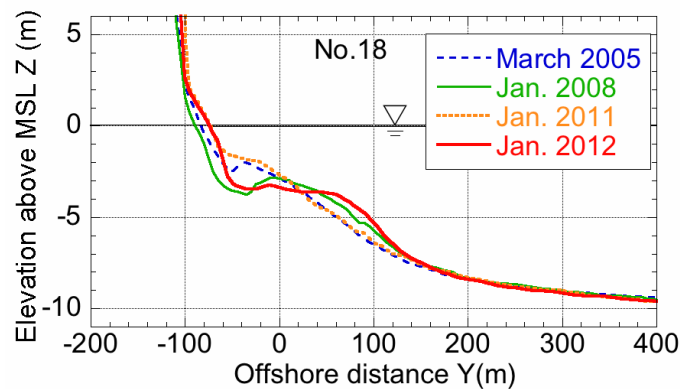


Fig. 4.4.9 Longitudinal profile along transect No. 18. <sup>5)</sup>

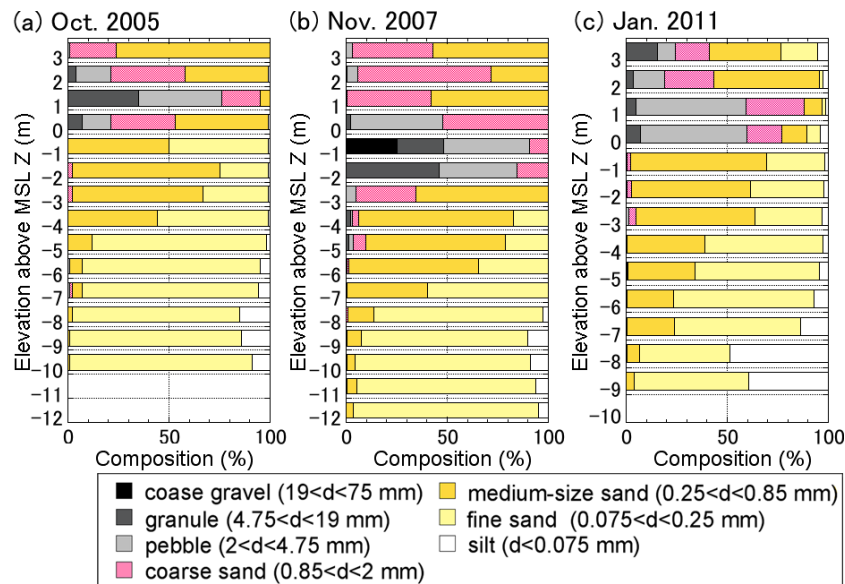


Fig. 4.4.10 Depth distribution of composition of bed materials along transect No. 18. <sup>5)</sup>

#### (6)高波浪による短期的な地形変化

茅ヶ崎中海岸では、海岸中央付近の防災無線用の鋼管に定点カメラが設置され、2007年1月30日以降、6時～18時の毎正時50秒の画像データが記録されている。このデータを解析することによって、養浜後の高波浪による短期的な地形変化を明らかにすることができる<sup>10)</sup>。

Fig. 4.4.11 は2011年の台風6号 ( $H_{1/3}=4.5$  m,  $T=12.4$  s) 来襲前後の平均化画像を示す。10 s以上の比較的周期の長い波が76時間と長時間にわたって作用した結果、7月23日では前浜に大量の礫が堆積してカスプが形成された。突堤の2層目ブロックが露出し地盤高が低下したが、汀線位置はほとんど変化していない。Fig. 4.4.12 は2011年の台風15号来襲前後の定点カメラ画像を示す。台風来襲後の9月27日は遊歩道に砂が打ち上がり、飛砂防止柵が陸側へと倒れていることから遊歩道上への越波があったことが明らかであるが、汀線位置が

わずかに後退したのみで大きな変化は見られない。Fig. 4.4.13 は、観測開始時の 2007 年 5 月 12 日と台風 15 号来襲後比較的静穏な状況が続いた後の 2011 年 12 月 27 日の平均化画像を示す。2011 年 12 月 27 日の画像には 2007 年 5 月 12 日の汀線位置を示すが、全体的に汀線は平行移動しつつ大きく前進し、突堤によって分断されていた汀線が連続的となったことが分かる。また、2011 年 12 月 27 日の画像より、高波浪後に前浜上に礫が現れても、波高が低く周期が長い波が長時間連続して作用すると前浜上の礫が砂に覆われた。このように波浪条件に対する礫と砂の土砂動態には大きな違いがある。

幾何補正変換した垂直画像から汀線位置を読み取り、2007 年 3 月 16 日の汀線を基準とした養浜後の短期的な汀線変化量を Fig. 4.4.14 に示す。これより、高波浪が作用した場合の短期的な汀線変動はほぼ 5 m 以下であることが分かる。



Fig. 4.4.11 Time-averaged images of shoreline before and after Typhoon No. 6. <sup>5)</sup>

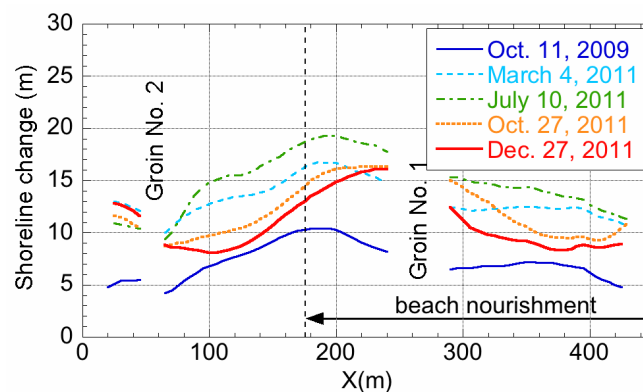


Fig. 4.4.12 Time-averaged images of shoreline before and after Typhoon No. 15. <sup>5)</sup>





**Fig. 4.4.13** Time-averaged images in May 2007 and December 2011. <sup>5)</sup>



**Fig. 4.4.14** Shoreline changes determined from image after geometrical correction with reference to that in March 2007. <sup>5)</sup>

## (7)まとめ

適正範囲内の養浜材を用いて、2006年から2011年までに計16.2万 $\text{m}^3$ の養浜が行われた茅ヶ崎中海岸では、汀線が15m程度前進し、前浜を中心に沖合の水深8m以浅において堆積が進んだ。また、養浜材に含まれる礫は、前浜付近に留まり海岸保全に効果的であり、高波浪が来襲した場合でも前浜は安定的であった。このように、流砂系の堆砂を活用した適正範囲内の養浜材を用いた養浜は、前浜だけでなく沖浜も含めた海岸全域の保全を図ることが可能であり、また、高波浪に対して強い砂浜を造ることができる。このことから、新たな養浜手法は、海岸保全手法として有効であると評価できる。

## 4.5. 結言

4 章では、より効果的かつ経済的な新たな養浜手法として、流砂系の土砂連続性の観点に基づき、本来、海岸への土砂供給源であった流砂系の堆砂を活用した適切な粒度組成の混合粒径材料を用いて、前浜だけでなく沖浜も含めて海岸全域の保全を図る手法について提案し、神奈川県茅ヶ崎中海岸を例に、現地データの解析や数値計算による養浜手法の検討方法を取りまとめた。これらの結果より、汀線付近を防護する礫は海岸保全を考える上で直接的に重要であるが、防護・環境・利用の全てにおいて理想的な養浜は、沖浜を構成する細砂を含む混合材料で実施することが最適と判断できた。また、実際に流砂系の堆砂を活用して、適正範囲内の養浜材を用いた継続的な養浜が行われている茅ヶ崎中海岸では、前浜だけでなく沖浜も含めた海岸全域の保全が図られつつあることから、新たな養浜手法は、海岸保全手法として有効であると評価できた。従来の養浜は、多くの場合、ダムや河道の浚渫材を、コストをかけて分級し海岸へ投入していたが、養浜材の適正範囲内であれば直接投入しても海岸保全に効果的であることが、本研究により理論的にも裏付けられた。

## 参考文献

- 1) 石川仁憲，宇多高明：閉空間と開空間での粗粒材養浜がもたらす効果・影響の相互比較，土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol. 67，No. 2，p.I\_1153-I\_1158，2011.
- 2) 宇多高明，青島元次，山野 巧，吉岡 敦，古池 鋼，石川仁憲：茅ヶ崎海岸における粒径を考慮した養浜工の効果予測，海岸工学論文集，第 54 巻，pp.631-635，2007.
- 3) Yoshioka, A., T. Uda, G. Aoshima, K. Furuike and T. Ishikawa: Field experiment of beach nourishment considering changes in grain size and prediction of beach changes Proc. 31st ICCE, pp.2694-2706, 2008.
- 4) 石川仁憲，三波俊郎，宇多高明，細川順一，和田昌明：茅ヶ崎中海岸における養浜の海岸保全効果の検証，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.68，No.2，p.I\_686-I\_690，2012.
- 5) Ishikawa, T., T. Uda, T. San-nami and J. Hosokawa: Verification of shore protection effect of beach nourishment on Chigasaki coast, Asian and Pacific Coasts 2013, Proc. 7th International Conf., pp. 1-8, 2013.
- 6) 宇多高明，青島元次，山野 巧，吉岡 敦，三波俊郎，石川仁憲：神奈川県茅ヶ崎中海岸の事例にみる養浜の考え方，海洋開発論文集，第 23 巻，pp.1057-1062，2007.
- 7) 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：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, 2006.
- 8) 熊田貴之・宇多高明・芹沢真澄・三浦正寛：波の遮蔽域形成に伴う 3 次元地形・粒径変化の予測法，海洋開発論文集，第 21 巻，pp. 1029-1034, 2005.
- 9) 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.
- 10) 宇多高明・石川仁憲・三波俊郎・湖内真帆・進藤 豊・和田昌明（2010）：定点カメラ画像の判読と幾何補正法による養浜効果の定量的測定，海岸工学論文集，第 57 巻，pp.591-595.



## 5. 新たな養浜手法Ⅱ：Moving Gravel Body 工法

### 5.1. 緒言

海岸侵食問題への対処においては、流砂系全体を俯瞰した上での土砂管理が必要である。その具体的事例として、遠州灘海岸を含む天竜川流砂系ではダム再編事業が進められ、ダム堆砂を下流へ流す計画が進められている。事業規模が大きく、実現までには長い年月を要することから、浜松篠原海岸など遠州灘沿岸では、侵食対策として河床掘削土砂を活用した養浜が行われている。しかし、天竜川などの急流河川の河床堆積土砂は礫を多く含むことから、細砂中砂からなる海岸に大量の礫が投入されると、2章で述べたように礫は汀線付近より陸側に急勾配をなして堆積するため前浜環境を急変させることになる。一方、静岡県富士海岸では、富士川からの流出土砂量の激減や、田子の浦港の防波堤による東向きの沿岸漂砂の遮断等により、昭和放水路の東側で著しい侵食が起きた。この対策として現地底質に比べてはるかに大きい粗粒材を用いた養浜が1996年より行われている。

粗粒材養浜は細砂養浜と異なり歩留まりがよいことから、4.2で述べたように神向寺海岸<sup>1)</sup>や秋谷海岸<sup>2)</sup>などでも行われている。これらの海岸はいずれもポケットビーチであり、投入礫の沿岸方向の移動は抑制されている。しかし遠州灘海岸や富士海岸のように一方向の卓越沿岸漂砂が著しく卓越する海岸では、投入礫が沿岸漂砂により運ばれるから、これらの事例とは異なった解釈が必要となる。5章では、一方向沿岸漂砂が卓越した長い直線状海岸に、現地海岸を構成する粒径に比べて大きい養浜材が投入された遠州灘や富士海岸の地形変化を調べ、その上で新たな養浜手法として Moving Gravel Body 工法を提案した<sup>3)4)</sup>。

### 5.2. 一方向沿岸漂砂が卓越する海岸での粗粒材養浜の効果（遠州灘篠原海岸の例）

天竜川の西側の馬込川河口右岸に位置する浜松篠原海岸（Fig. 5.2.1）では、天竜川からの流出土砂量の激減とともに侵食が進み、2003年には、河口右岸にあった浜松市のごみ処分地が侵食されてごみが流出するなど、大きな被害が出た。この海岸では、約30万 $\text{m}^3/\text{yr}$ の西向きの沿岸漂砂量が卓越する。Fig. 5.2.2には浜松篠原海岸の空中写真を示す。2005年には河口西側隣接部の汀線が後退し、河口導流堤の東側と西側の汀線位置に110mの差が付き、汀線の後退区域は河口の西1.8km（測線No.164）付近にまで及んでいた。このため緊急対策として、2005年1～3月に $9 \times 10^4 \text{ m}^3$ の緊急養浜が実施された。さらに3基の離岸堤と、天竜川の河床堆積土砂（粗粒材）を毎年 $5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 投入する養浜計画が立てられたが、実際には、2013年1月までの総投入土砂量は $83.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ に達した。この結果、一時は大きく後退していた馬込川河口右岸の汀線が2013年1月までにFig. 5.2.3のように大きく前進した。5.2

では、空中写真や深浅測量データなどを基に、このような粗粒材養浜後の海浜変形について分析し、その保全効果について明らかにした<sup>5)6)</sup>。

浜松篠原海岸の海浜変形に関する既往研究として、宇多ら<sup>7)</sup>は、天竜川河口から浜名湖今切口まで 20 km 区間を対象として均一粒径土砂による養浜の効果について検討し、これより馬込川河口隣接部で  $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$  の養浜を行えば海浜の復元が可能なことを示した。その後、宇多ら<sup>8)</sup>は、底質粒径の水深方向分布調査を行い、この海域の底質が主に細砂中砂で構成され、侵食域でのみ礫が出現することを明らかにした上で、粒径を考慮した等深線変化モデルを適用し、モデル上に動的平衡海浜を構築し、細粒、中粒、粗粒の粒径集団に対し平衡勾配を 1/100, 1/40, 1/20 として地形変化予測計算を行った。計算より  $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$  の粗粒材養浜の効果が確認された。石川ら<sup>9)10)</sup>は、浜松篠原海岸で 2009 年までに行われた  $3.5 \times 10^5 \text{ m}^3$  の粗粒材養浜後の海浜の質的变化と礫の移動特性を現地実測により調べ、礫は波による強い攪乱を受ける汀線や前浜で集中的に移動し、-1~1 m 間に集中的に堆積することを明らかにした (Fig. 5.2.4, 5.2.5)。さらに宇多ら<sup>11)</sup>は、粒径を考慮した等深線変化モデルにより動的平衡海浜を造り出した上で、養浜土砂の移動予測を行った結果、粒径の大きな土砂は汀線に沿って運ばれることを示した。

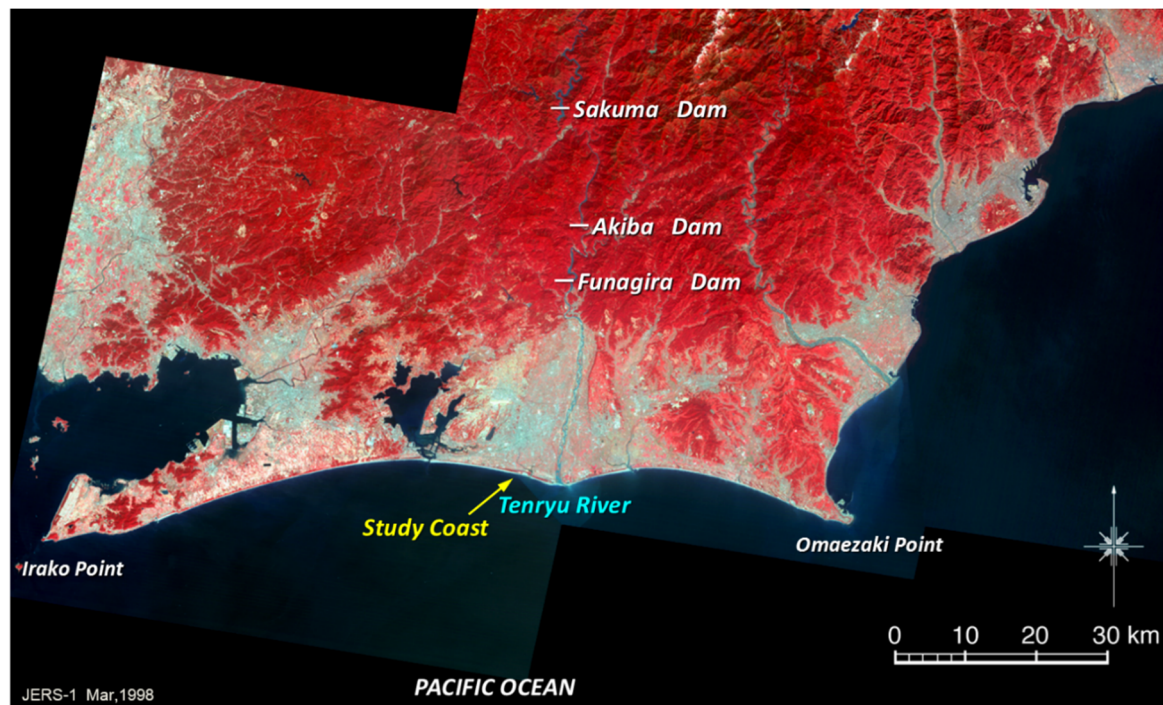


Fig. 5.2.1 Location of Hamamatsu-Shinohara coast.



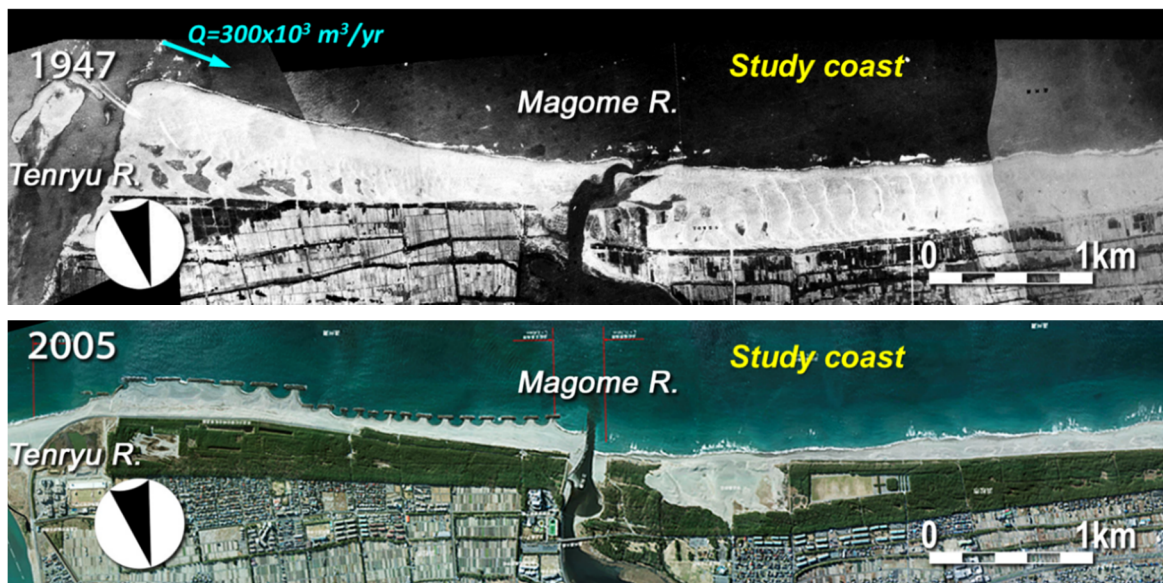


Fig. 5.2.2 Aerial photographs of study coast in 2005 and 2013. <sup>6)</sup>

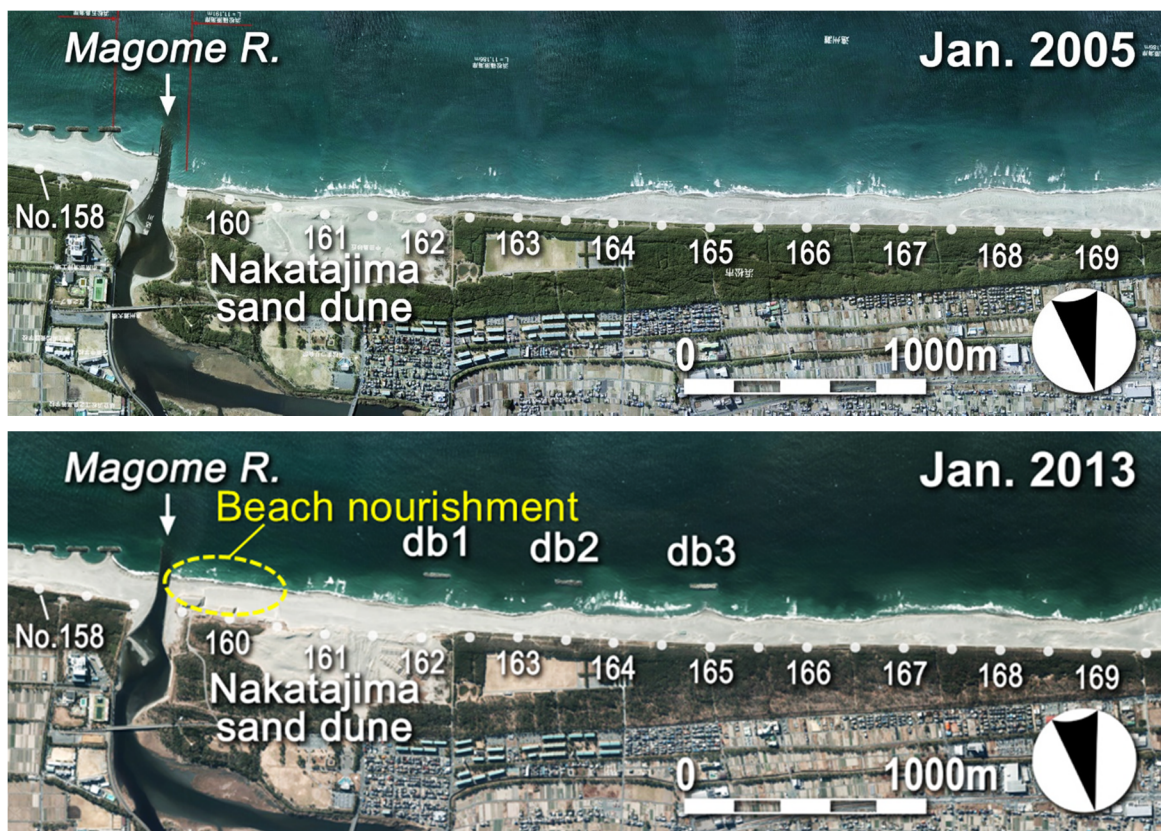


Fig. 5.2.3 Aerial photographs of study coast in 2005 and 2013. <sup>6)</sup>



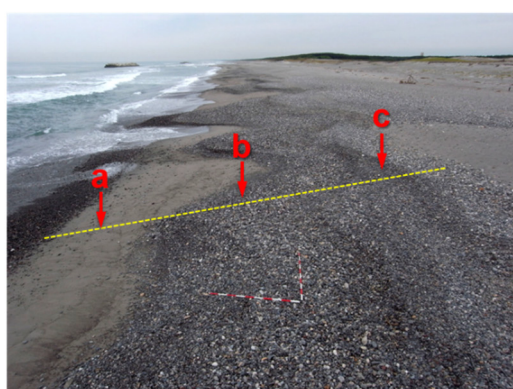
(a) Front of artificial mound



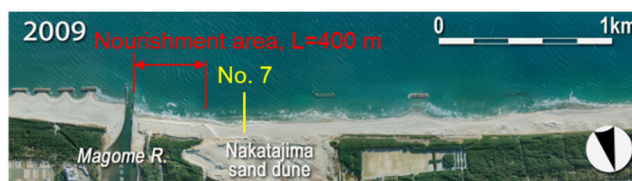
(b) West of artificial mound



Fig. 5.2.4 Beach condition after gravel nourishment taken on September 2009.



(a) Near the shoreline



(b) On the foreshore

(c) On the berm top



Fig. 5.2.5 Vertical distribution of gravel and sand layers on foreshore along transect No. 7. <sup>10)</sup>

### (1) 養浜の実態

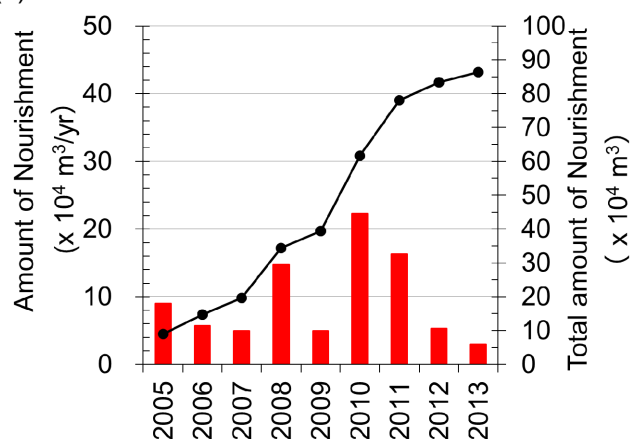
浜松篠原海岸では、2005 年の  $9 \times 10^4 \text{ m}^3$  の緊急養浜後計画量以上の養浜が行われ、2013 年 1 月までの総投入土砂量は  $83.3 \times 10^4 \text{ m}^3$  であった (Table 5.2.1)。養浜材には天竜川下流域の河床堆積土砂が用いられた。Fig. 5.2.6 には 3 ヶ年毎の養浜材の平均粒度組成を示す。浜松篠原海岸は主に細砂・中砂で構成されている海岸であるが、養浜材には礫を多く含む粗粒材が用いられた。具体的には、養浜箇所の前浜は  $d_{50}=0.4\text{mm}$  (1994 年) であったが、これに対し、養浜材の平均粒度組成は、大礫 26.5%、中礫 16.5%、細礫 5.3%、粗砂 3.8%、中砂 25.3%、細砂 13.9%、シルト 8.8% であり、現地粒径より大きい材料 (粗砂以上) が 50% 以上含まれ、また 100 倍程度の大きさの材料 (大礫) が 25% 程度含まれていた。一方、従来の養浜では養

浜土砂は **Fig. 5.2.7** に示すように盛土状に高く積みれ、汀線への砂供給量が小さかったことから、2011 年以降、山積された土砂を汀線へ押し出す工事（押土）が行われた。

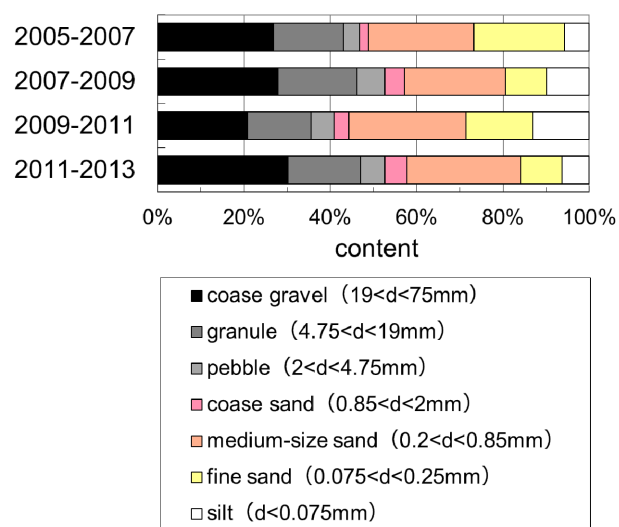
**Table 5.2.1** Actual condition of beach nourishment.

Period	Amount ( $\times 10^4 \text{ m}^3$ )
Jan., 2005 ~ March, 2005	9.0
Sep., 2006 ~ Feb., 2007	5.7
Nov., 2007 ~ Feb., 2008	5.0
Nov., 2008 ~ March, 2009	14.7
Dec., 2019 ~ Feb., 2010	5.0
Nov., 2010 ~ March, 2011	22.3
Nov., 2011 ~ March, 2012	16.3
Oct., 2012 ~ Jan., 2013	5.3
Oct., 2013 ~ March, 2014	3.0
Total	86.3

(a) Amount of nourishment



(b) Content of nourishment



**Fig. 5.2.6** Conditions of beach nourishment. <sup>6)</sup>



**Fig. 5.2.7** Method of beach nourishment.

## (2)波浪条件

浜松篠原海岸の東 8 km, 水深 25 m では波浪観測が行われている. 養浜開始前の 2004 年から 2014 年までの波浪観測結果を **Fig. 5.2.8** に示す. 観測結果より有義波高 6m を閾値と見なし, これを越える有義波高の発生日時と波浪の継続期間をまとめると **Table 5.2.2** となる. 2005～2008 年では相対的に波高が低かったが, 2009 年以降高波浪の出現頻度が高まると同時に, 波高の増大も認められる. **Fig. 5.2.9** には, 養浜期間 (2005～2013 年) の波向別エネルギー比を示す. これによれば養浜期間中のエネルギー平均波向は  $1^\circ$  左回りの方向 (N191° E) であり, 海岸線に対してほぼ正面から波が入射する条件にあった.

**Table 5.2.2** Date of significant wave height over 6 m.

Date	Significant wave		Duration (h)
	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)	
Feb. 8, 2005	7.90	12.9	1
July 26, 2005	6.93	14.4	7
Aug. 25, 2005	6.13	12.7	6
July 15, 2007	7.13	11.2	5
Sep. 25, 2008	7.22	8.7	1
Oct. 8, 2009	10.75	13.9	6
July 19, 2011	8.29	14.8	35
Sep. 2, 2011	7.48	12.2	22
Sep. 21, 2011	11.69	15.7	7
June 19, 2012	11.12	15.8	10
Sep. 30, 2012	11.53	14.1	5
Sep. 15, 2013	8.65	12.9	13

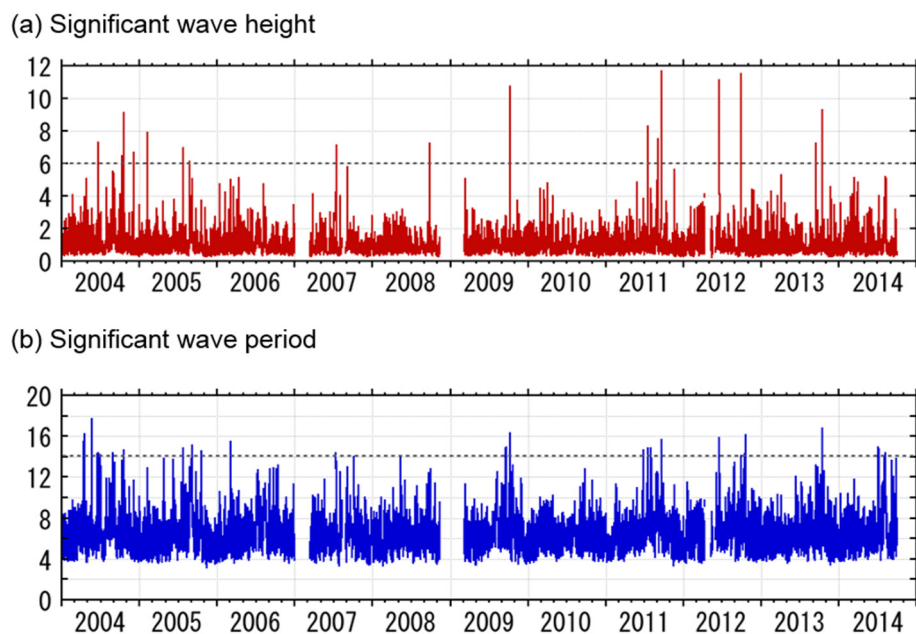


Fig. 5.2.8 Wave condition between 2005 and 2013. <sup>6)</sup>

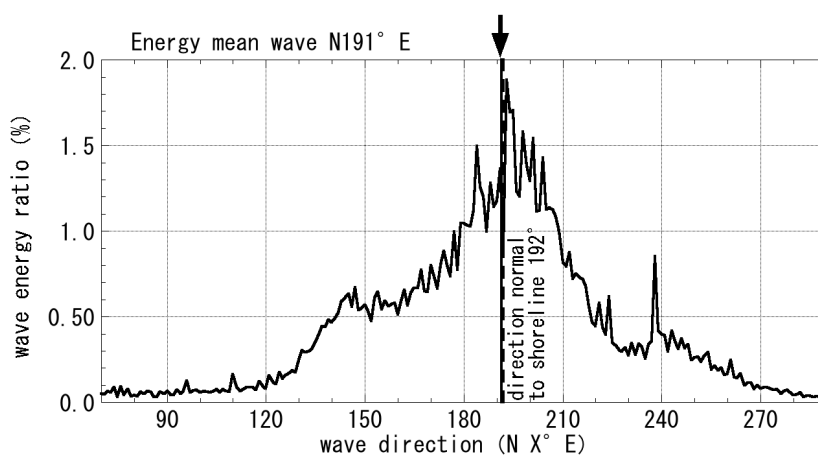


Fig. 5.2.9 Wave energy ratio of each wave direction between 2005 and 2013. <sup>6)</sup>

### (3)空中写真に基づく汀線変化解析

馬込川河口の西側隣接部を中心とした区域について、2005 年を基準とした汀線変化を Fig. 5.2.10 に示す。養浜区間では、2005～2013 年に馬込川右岸で汀線が最大 120 m 前進した。汀線前進量は西向きに減少しているが、2 号堤の背後までの全区間で汀線が前進している。一方、1, 2 号堤、および 2, 3 号堤の開口部では汀線の局所的後退も起きている。しかし 3 号堤の西側の 700 m 区間では 2005 年と比べて汀線の後退が著しい。

同一区域での浜幅の分布を Fig. 5.2.11 に示す。浜幅は 2005 年には馬込川河口隣接部で 20 m 未満と非常に狭かったが、西向きに増大し X=8 km では 160 m の浜幅であった。しかし粗粒材養浜の効果が現れて馬込川河口隣接部で大きく増加し、2013 年では最大 120 m の広が



りを示した．このように粗粒材養浜の効果が顕著に現れたことが分かる．一方，3号堤の下手側区域では，2011年までは系統立った汀線変化は見られなかったが，2013年のみ他の時期と特徴が異なり，浜幅が狭い場所が周期的に現れている．これらは浅海域での沿岸砂州の発達に対応した汀線変化と考えられる．

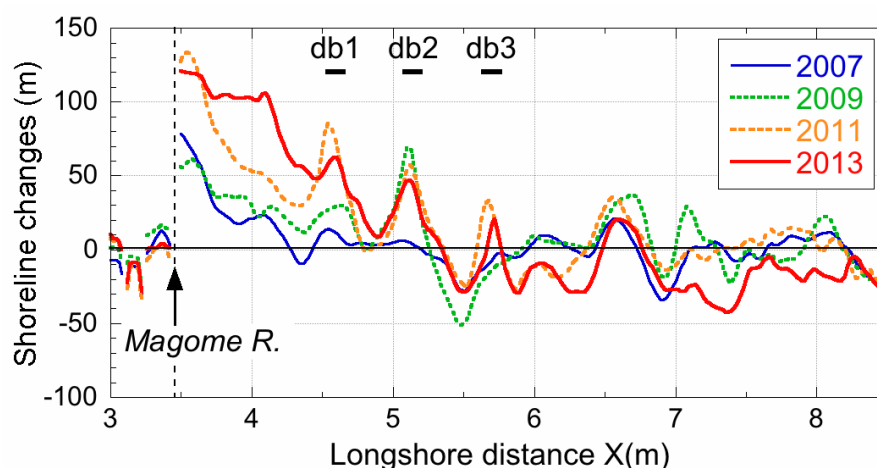


Fig. 5.2.10 Shoreline changes on study coast up to 2013 with reference to 2005. <sup>6)</sup>

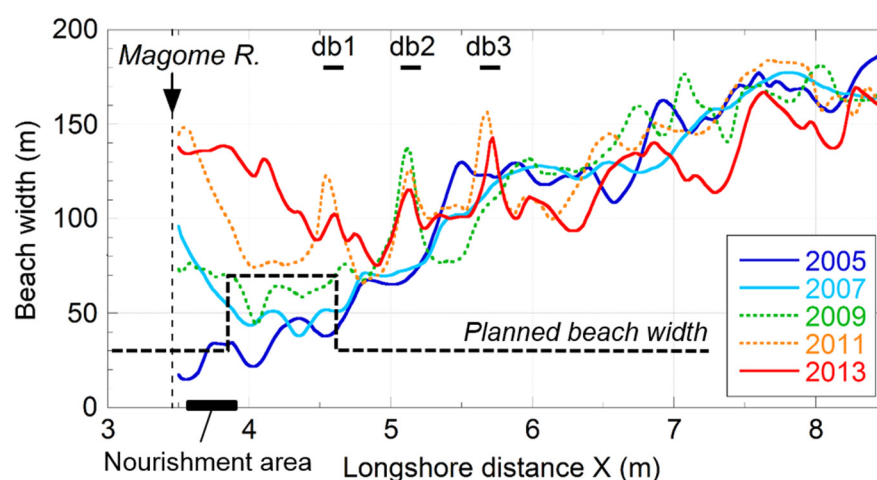


Fig. 5.2.11 Beach width changes and the planned beach width on study coast. <sup>6)</sup>

#### (4) 平面深浅データの解析

2013年の浜松篠原海岸の深浅図と2005年基準での地形変化量の平面分布を Fig. 5.2.12, 5.2.13 に示す．地形変化量の平面分布によれば，馬込川河口の西側の前浜では，粗粒材養浜により著しく堆積したことが分かる．しかしその一方で，浜松篠原海岸の沖合では，天竜川河口から西側へと連続的な深みが形成され，著しく侵食が進んでいる．このような海岸線に沿った深い溝の形成は，その付近の底質が中砂細砂であったことを考慮すれば，天竜川からの

砂供給量が激減した状況下で、西向きの沿岸漂砂とのバランスが失われ、次第に急深な海岸に変わりつつあることを表していると推察される。

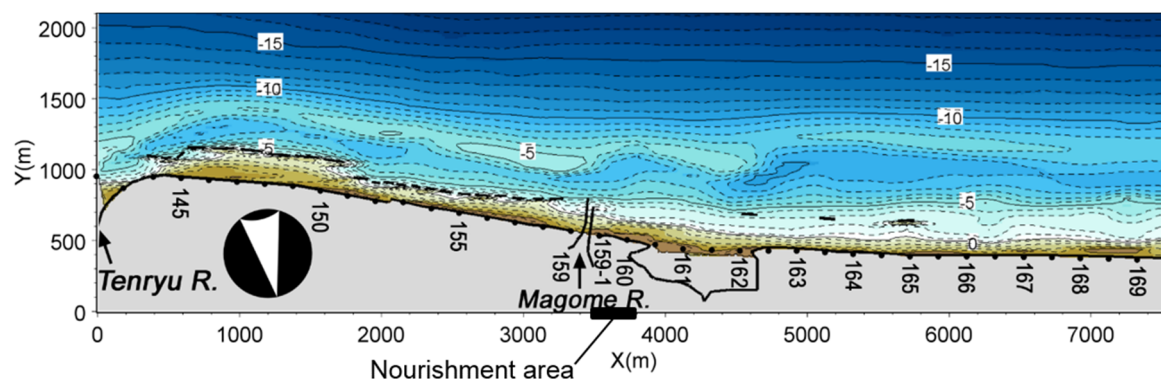


Fig. 5.2.12 Bathymetry measured in 2013. <sup>6)</sup>

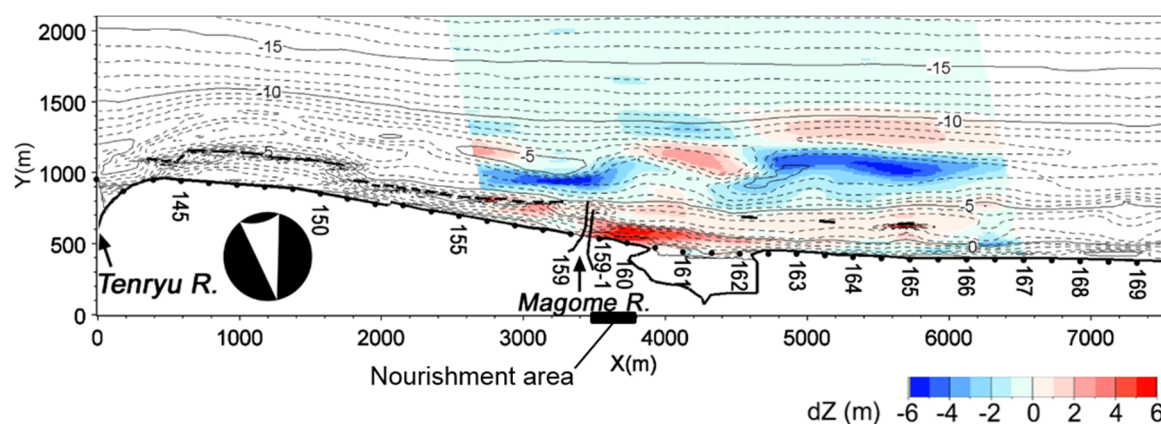


Fig. 5.2.13 Bathymetric changes with reference to bathymetry in 2005. <sup>6)</sup>

##### (5)縦断形変化と中央粒径 $d_{50}$ および粒度組成の水深分布の関係

粗粒材養浜の施工区間を通る測線 No.160 とその西側に位置する No. 162 における縦断形変化と  $d_{50}$  と粒度組成の水深方向分布を Fig. 5.2.14 に示す。No.160 では陸側から土砂の押し出しが行われたため、階段状の縦断形が形成され、盛土標高が高いために浜崖の比高も著しく高い。浜崖をなした急斜面は陸上部から-2 m 付近まで続いているが、その沖には緩勾配の海底面が形成されている。粒度組成によれば、-2 m 以浅に礫が集中的に堆積し、-3 m 以深は大部分が中砂であり、水深が増すと細砂の含有率が増している。一方、養浜区間から西に離れた 1 号離岸堤近傍の No.162 では、-5、-6 m でわずかに礫が堆積してはいるが、これを除けば汀線付近は中砂が大部分を占め、水深の増加とともに細砂の含有率が増すという分布である。

Fig. 5.2.15 には測線 No. 160 の養浜前後の粒度組成の水深方向分布を示す。本来、中砂細砂で構成されていた前浜は、養浜後は主に礫で構成されていることが分かる。

以上の観測結果より、浜松篠原海岸で投入された養浜材のうち礫はほぼ-2 m 以浅に集中的に堆積し、養浜前に比べて前浜の構成材料が変わったことが確認された。大きな礫の沿岸方向の移動は養浜箇所から 1 号離岸堤間で留まっていると考えられ、この結果は、石川ら<sup>9)10)</sup>による礫の移動特性の観測結果から得られた結果とよく一致した (Fig. 5.2.16)。

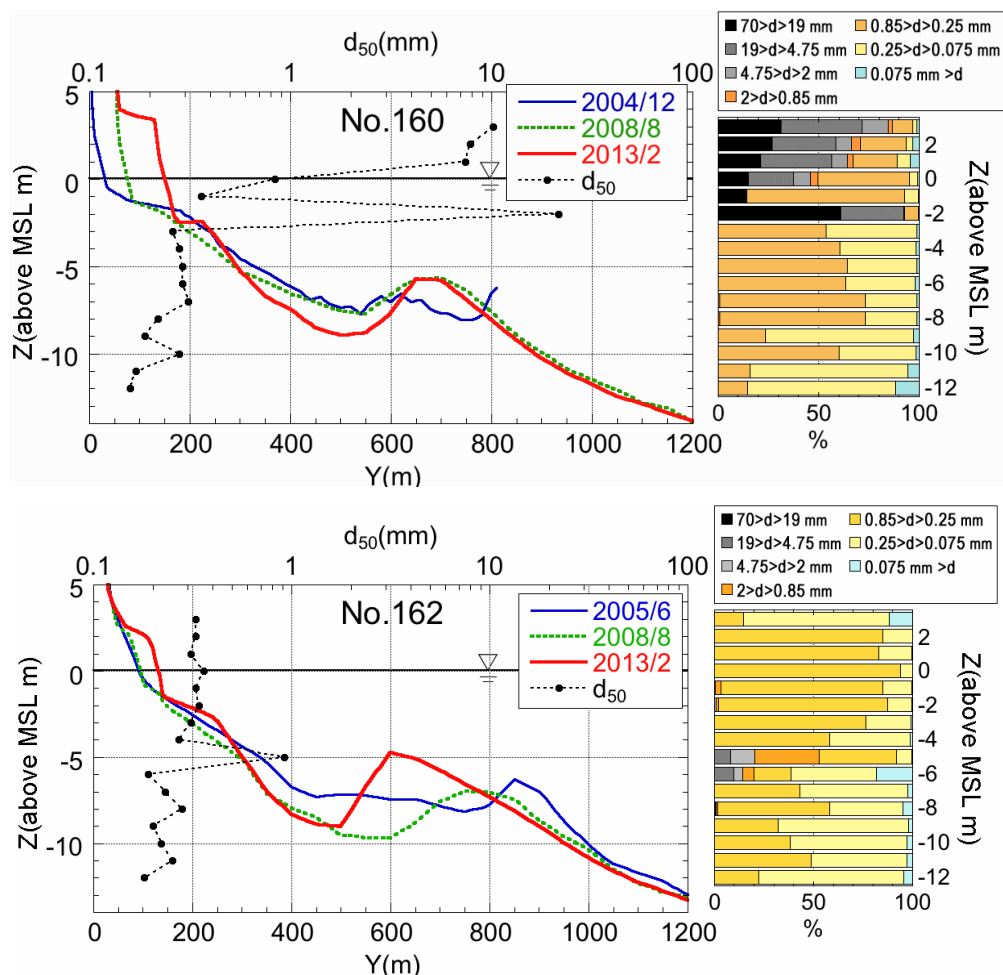


Fig. 5.2.14 Changes in longitudinal profile, depth distribution of median diameter and composition along transect Nos. 160 and 162. <sup>6)</sup>

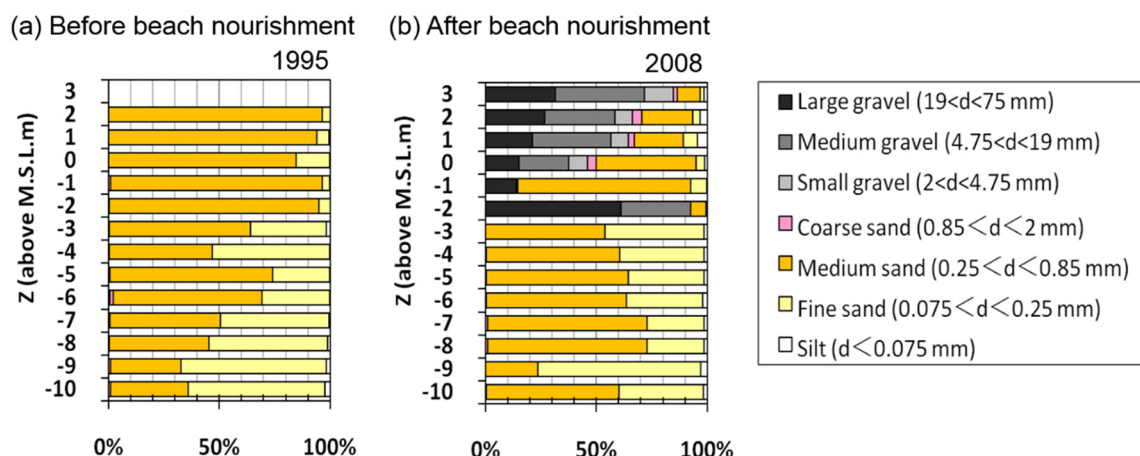


Fig. 5.2.15 Comparison of composition along transect No. 160 before and after gravel nourishment.<sup>10)</sup>

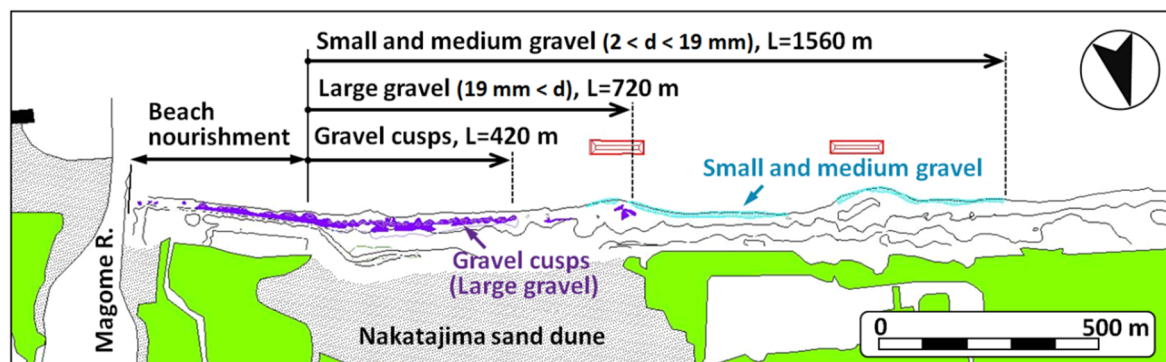


Fig. 5.2.16 Formation zone of gravel cusps, longshore distribution of each grain size of gravel on Sep., 2009.<sup>10)</sup>

## (6)まとめ

約 30 万  $\text{m}^3/\text{yr}$  の西向きの一方向沿岸漂砂量が卓越する浜松篠原海岸では、侵食対策として 2005 年より礫を多く含む大量の粗粒材養浜が継続的に行われてきた。細砂中砂で構成された海岸に 100 倍程度の大きさの礫が養浜材に用いられたことと、2013 年 1 月までに計画量以上の計  $83.3 \times 10^4 \text{ m}^3$  の養浜材が投入されたことが特徴である。この結果、2013 年 12 月までの馬込川河口西側の汀線前進量は最大 130 m に達した。また、養浜区域周辺では、ほぼ -2 m を境に海底勾配が大きく変化し、礫は -2 m 以浅の前浜に集中的に堆積した。これより、礫は -2 m 以浅において汀線に沿って沿岸方向に移動し、汀線付近の地形変化は礫の移動に強く影響を受けることが分かった。

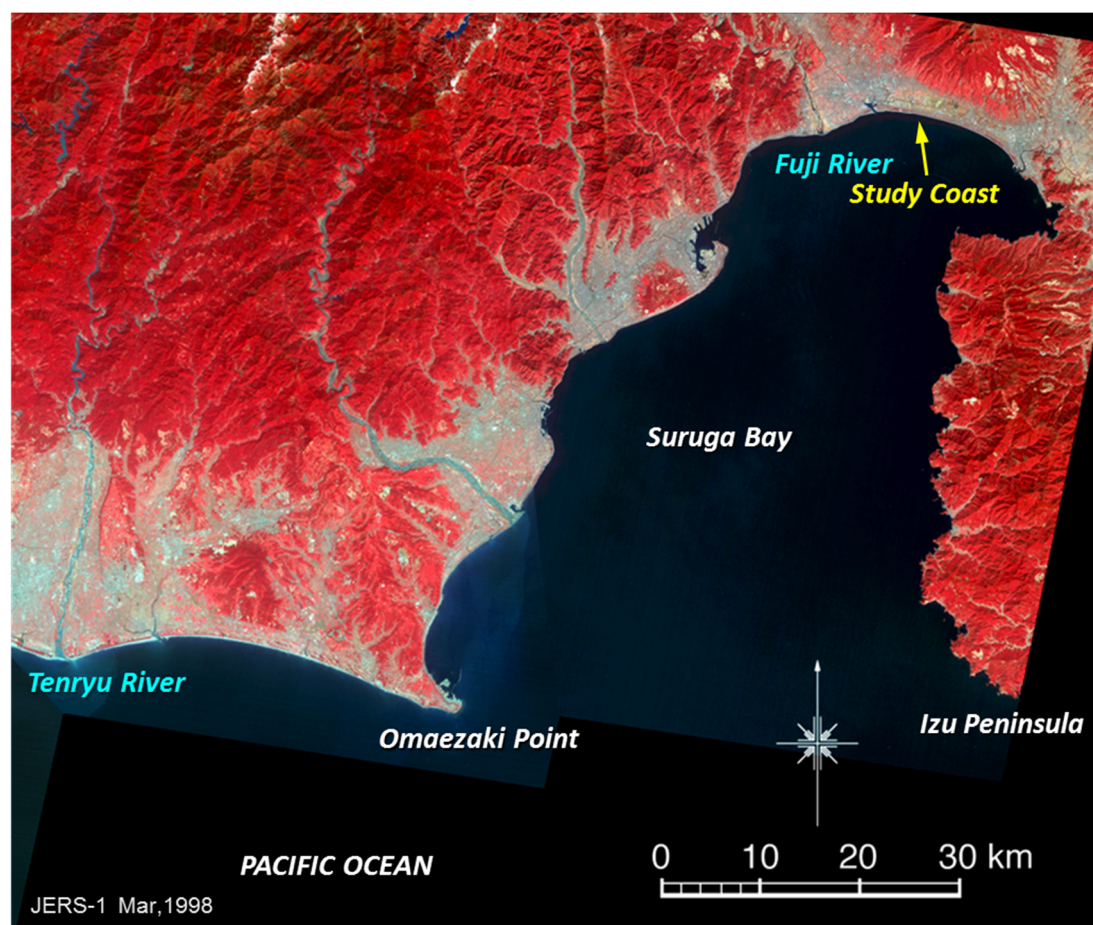
以上のことから、浜松篠原海岸では、現地の底質粒径に比べて 100 倍程度の大きさの礫を多く含む養浜材が計画量以上投入され、さらに期間中西向きの沿岸漂砂が弱かったことなど

により、養浜区域周辺の前浜が著しく広がり、集中的な海岸保全効果が現れたと考えられる。  
しかしその一方で、天竜川からの砂分の供給量の激減により、養浜区域の沖合では著しく侵食が進んでいることが明らかになった。

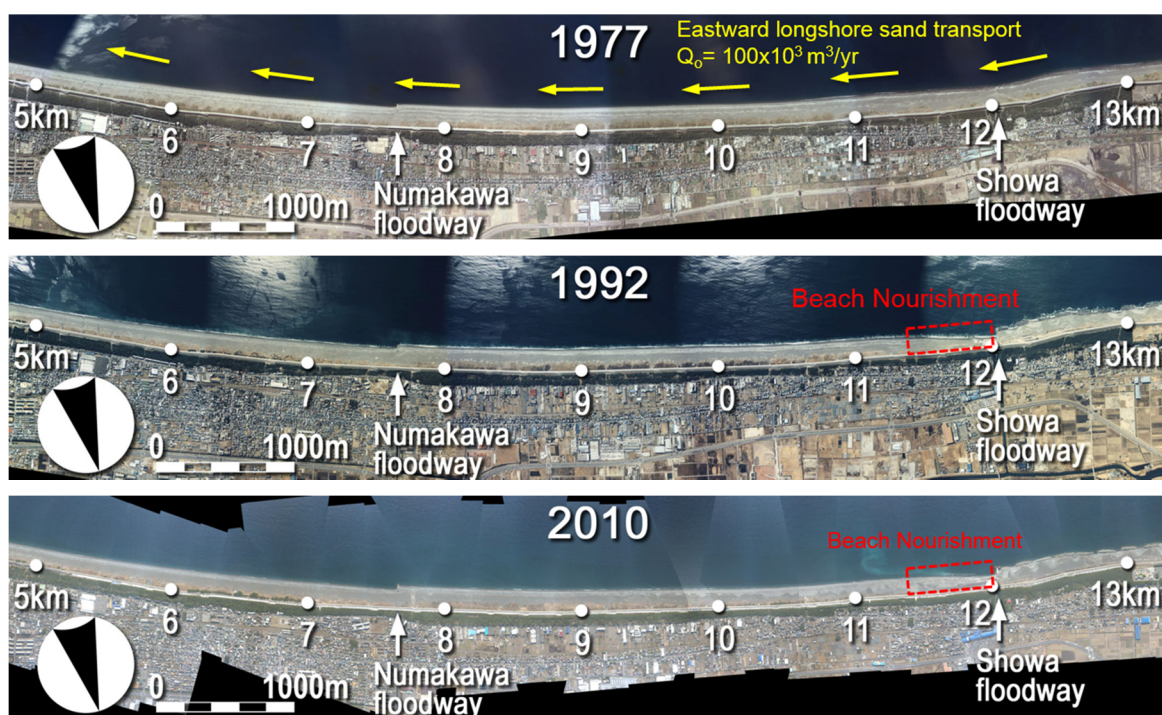


### 5.3. 一方向沿岸漂砂が卓越する海岸での粗粒材養浜の効果（静岡県富士海岸の例）

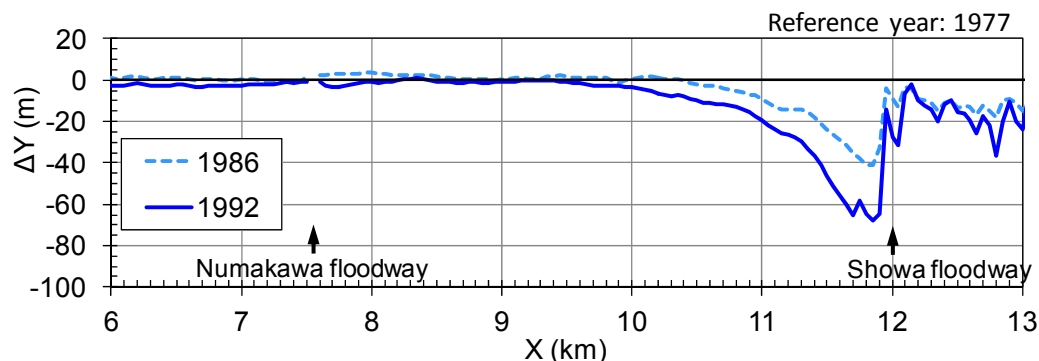
富士海岸は、駿河湾奥に流入する富士川の河口から沼津港まで約 22 km にわたって延びた砂浜海岸であり、富士川の流出土砂が東向きの沿岸漂砂により運ばれ、堆積して形成された海岸である（**Fig. 5.3.1**）。しかし、1967 年以前、建設骨材の取得のための河床掘削が富士川で大規模に行われた結果、河川流出土砂量が激減し<sup>12)</sup>、同時に河口の東約 6 km に田子の浦港の防波堤が伸ばされて東向きの沿岸漂砂が遮断された結果、田子の浦港の東側区域では著しい侵食が発生した。田子の浦港の東約 3.5 km に位置する昭和放水路の東側では、**Fig. 5.3.2, 5.3.3** に示すように 1946 年から 1996 年までに汀線が最大 50m も後退した。対策として昭和放水路の東側近傍において 1996 年より粗粒材養浜が開始され、2010 年までに  $1.38 \times 10^6 \text{ m}^3$  の礫が投入された。この海岸では、約 10 万  $\text{m}^3/\text{yr}$  の東向きの沿岸漂砂量が卓越するとともに、沖の海底地形が急勾配であることから、海浜砂の沖への流出が起きている。**5.3** では、養浜後の地形変化と底質粒度組成より、粗粒材の土砂動態と保全効果を明らかにした<sup>4)13)</sup>。



**Fig.5.3.1** Location of Fuji coast.



**Fig.5.3.2** Aerial photographs of Fuji coast taken in 1977 and 2010 (provided by Numazu Office of River and National Highway of the Chubu Regional Bureau, MLIT). <sup>4)</sup>



**Fig.5.3.3** Shoreline changes on Fuji coast between 1977 and 1992 with reference to that in 1977. <sup>4)</sup>

### (1) 養浜の実績

富士海岸の昭和放水路東側において 1996 年以降行われてきた粗粒材養浜では、2010 年までに陸上部で  $8.7 \times 10^5 \text{ m}^3$ 、海上で  $5.0 \times 10^5 \text{ m}^3$  (合計  $1.38 \times 10^6 \text{ m}^3$ ) の養浜材が投入された。養浜材には、現地の前浜構成材料の粒径  $d_{50}=2 \sim 3 \text{ mm}$  (1986 年) に対し、15～75 倍の  $d_{50}=50 \sim 150 \text{ mm}$  の大礫が用いられた (**Fig.5.3.4**)。大礫は、主に富士砂防での発生土砂であるが、それらの礫は富士山起源の玄武岩のため黒く、富士川の流出土砂とは色彩が大きく異なる。陸上養浜は、**Fig.5.3.5** に示すように後浜での盛り土養浜の手法で行われ、毎年 10 月～3 月に



土砂が運び込まれた。一方，海上養浜では水深 5 m 程度の浅海域に土砂を直接投入する方式が用いられた。



**Fig.5.3.4** Nourishment materials composed of large gravel of 50-150 mm.



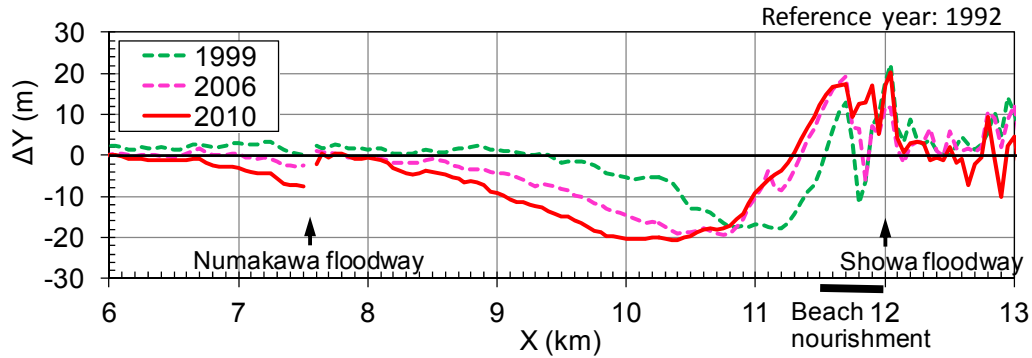
**Fig.5.3.5** Current condition of nourishment area on Fuji coast.

## (2)養浜後の地形変化

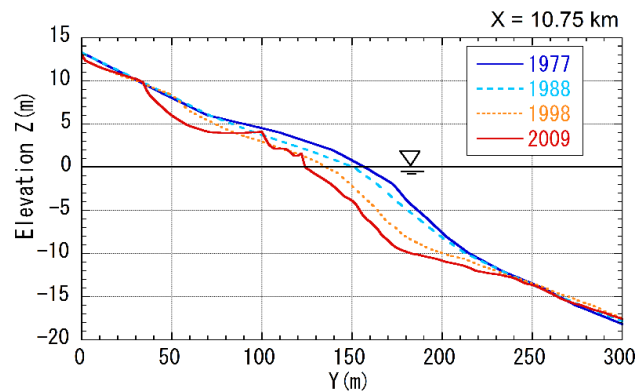
**Fig.5.3.6** には 1992 年基準での汀線変化を示す。1992 年以降，養浜に伴い放水路の東側隣接部では汀線が最大 20 m 前進した。しかしながら，養浜区域の下手側では侵食域が時間経過とともに東側へと移動している。例えば，汀線が最も後退した地点は X=11.25 km (1999 年)，10.85 km (2006 年)，10 km (2010 年) と東側へと移ったことに特徴がある。**Fig.5.3.7** には，養浜区域下手側に位置する X=10.75 km 地点の縦断形変化を示すが，1977 年から経年的に侵食が進み，2009 年では **Fig.5.3.8** に示すように後浜に高さ 2 m 程度の浜崖が形成された。

1996 年基準での地形変化量の平面分布を **Fig. 5.3.9** に示す。養浜開始後，昭和放水路の東側区域では堆積域が東側へと広がった。土砂の堆積はほぼ 10 m より陸側で顕著であり，逆に

堆積域沖の-10 m 以深では緩やかに侵食が進んでいる。また、粗粒材養浜に伴う堆積域の東側への広がりと同時に、堆積域の東側では侵食が進んでいる。侵食は時間経過とともに次第に顕著になるとともに、海面下のみでなく後浜でも顕著な侵食が見られる。この理由として、西側から供給される大きな礫が分布する水深帯では海浜が維持されたものの、陸側、海側では本来その場所を構成していた砂分の供給がないため侵食が進んだと考えられる。



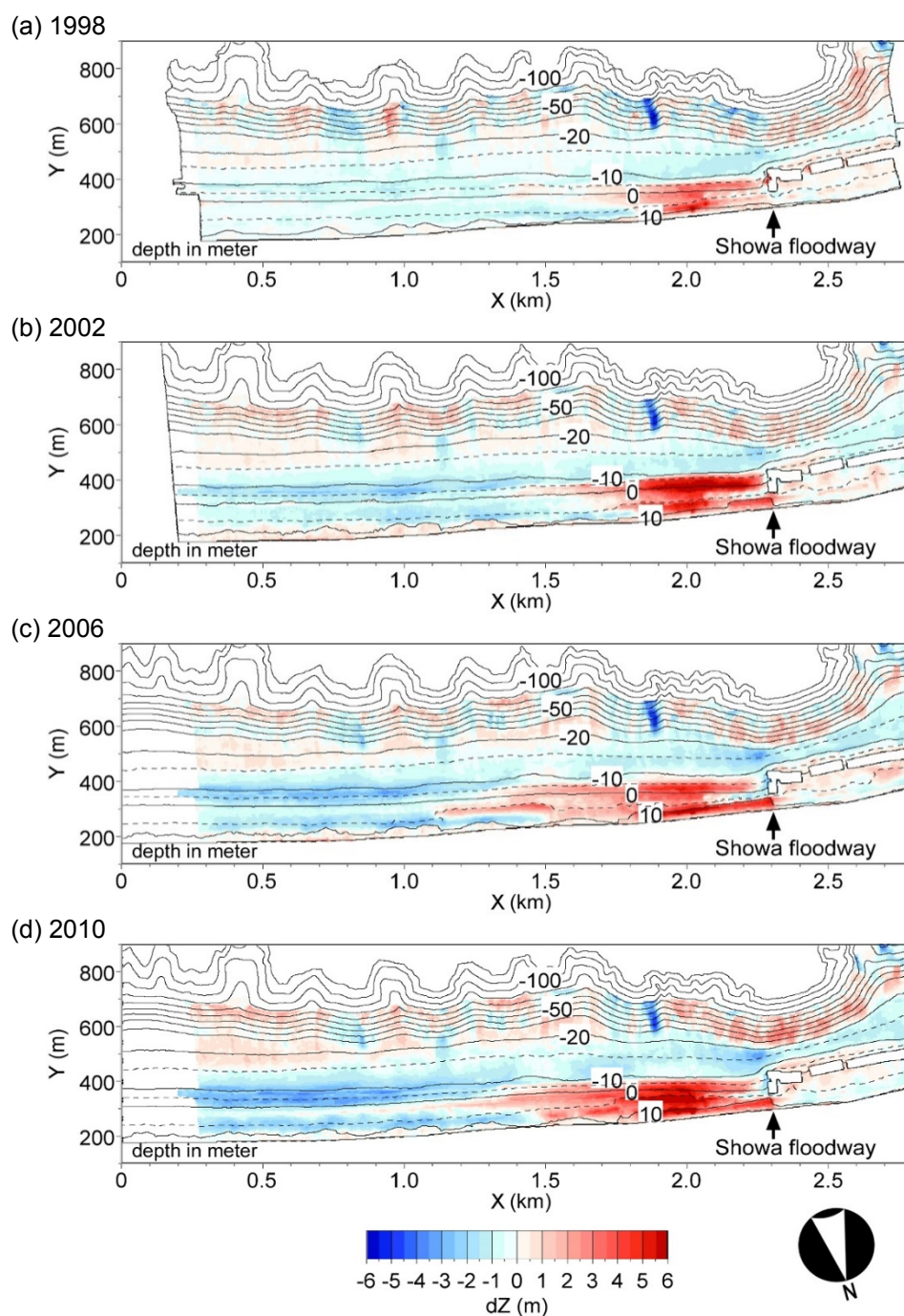
**Fig.5.3.6** Shoreline changes after beach nourishment with reference to that in 1992. <sup>4)</sup>



**Fig.5.3.7** Changes in longitudinal profile downcoast of nourishment area ( $X = 10.75$  km) (provided by Numazu Office of River and National Highway of the Chubu Regional Bureau, MLIT). <sup>4)</sup>



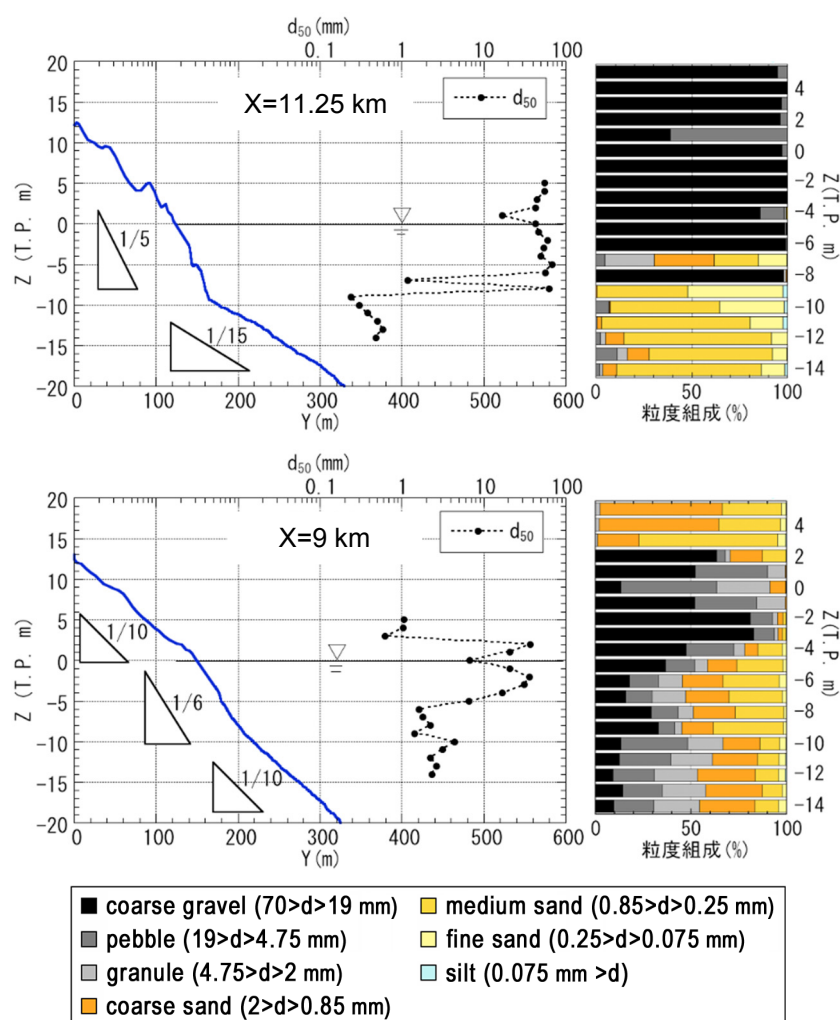
**Fig.5.3.8** Scarp formation downcoast of nourishment area on Fuji coast.



**Fig.5.3.9** Bathymetric changes after beach nourishment with reference to that in 1996 using narrow-multibeam survey data (provided by Numazu Office of River and National Highway of the Chubu Regional Bureau, MLIT). <sup>4)</sup>

### (3)底質粒度組成

**Fig. 5.3.6** の  $X=9$  km, 11.25 km の縦断形と粒度組成の水深方向分布を **Fig. 5.3.10** に示す。養浜区域に位置する  $X=11.25$  km では、水深 6 m まで大礫で覆われ、汀線～水深 6 m の海底勾配は 1/5 と急斜面である。縦断形は水深 10 m 以深で勾配が緩やかになるが、これに対応して水深 10 m 以深で粒度組成が大きく変わり、海底面は中砂と細砂でほとんど覆われている。このように投入された粗粒材は汀線付近の急勾配斜面にへばり付くように堆積している。一方、養浜区域の東端から約 2 km 東へ離れた侵食域である  $X=9$  km では、汀線付近は礫で構成されるが T.P.+2 m より陸側は主に中砂、細砂で構成される。また、水深 5 m 以深での大礫の含有率は水深とともに減少しており、これに応じて沖浜勾配も 1/10 と相対的に緩やかである。



**Fig.5.3.10** Longitudinal profile, depth distribution of median diameter and composition along  $X=9$  km, 11.25 km. <sup>13)</sup>

#### (4)まとめ

約 10 万  $\text{m}^3/\text{yr}$  の東向きの沿岸漂砂量が卓越する富士海岸の昭和放水路の東側では、1996 年より侵食対策として現地の前浜構成材料の 15～75 倍の  $d_{50}=50\text{-}150\text{ mm}$  の大礫による粗粒材養浜が行われ、2010 年までに  $1.38 \times 10^6\text{ m}^3$  の礫が投入された。この結果、養浜土砂は 10 m 以浅に堆積し汀線が著しく前進した。このように粗粒材を用いた養浜は海岸保全に一定の効果を発揮している。しかし、その一方で養浜区間の東側では時間経過とともに侵食域が東側に広がった。このことから、一方向の沿岸漂砂が卓越する海岸において、その海岸を構成している砂礫に比べて大きな粒径の養浜材を投入した場合、養浜材の移動速度が遅く、養浜材がまとまって移動するため、養浜区域の下手側で新たに侵食が起こることが分かった。



#### 5.4. Moving Gravel Body 工法の提案

浜松篠原海岸や富士海岸の事例のように、現地海岸を構成する粒径に比べて大きい養浜材（礫）が投入された場合、投入された礫は前浜に集中して堆積し、また砂と比べてその移動速度が小さいので、投入礫は投入点付近から下手側に緩やかに移動していくことが分かった。ここで、その堆積断面の勾配は離岸堤を切る断面のように直角に近いものでもなく、また中砂細砂で構成された海浜の海底勾配より急な、中間的な勾配である。この斜面はいわばある沿岸距離の中で漂砂移動を緩やかに低減させる能力を有し、構造物のようにその位置で沿岸漂砂の非平衡状態を作り出すものではない。一方向沿岸漂砂が卓越する海岸において、構造物による対策では、ある水深帯の沿岸漂砂が完全に遮断され、下手側で著しい侵食を引き起こすが、これに対し粗粒材（礫）は緩やかな保全効果の発現と下手側への影響の軽減が可能と考えられ、新たな養浜手法と考えられる。そこで、この手法をその特徴から「Moving Gravel Body：礫体による漂砂制御工法（MGB 工法）」と呼ぶ。5.4 では、粒径を考慮した等深線変化モデル<sup>14)</sup>を用いて MGB 工法の概念を明らかにした<sup>4)</sup>。

##### (1)計算条件

波高  $H=1.6$  m の波が左斜めに  $10^\circ$  の方向から入射し、右向きの沿岸漂砂  $Q_0=10$  万  $\text{m}^3/\text{yr}$  が生じる海浜を想定した。基準粒径は  $d_0=1$  mm で、平衡勾配が  $\tan \beta_0=1/10$  の一様勾配斜面を考えた。ここで、粒径を考慮した等深線変化モデル<sup>14)</sup>では、砂礫の移動し易さは粒径を  $d$  としたとき  $\sqrt{d}$  で表現される。この条件の下で、計算領域左端からの沿岸漂砂の流入が 0 となったと仮定した。右端は固定境界 ( $d_{qx}/dx=0$ ) を与え、一定の沿岸漂砂量が流出する条件とした。計算条件を Table 5.4.1 に示す。この条件で 8 ケースの計算を行った。ケース 1 は養浜を実施せず 10 年間そのまま放置した計算である。ケース 2～8 は、現地粒径  $d_0$  に対し Table 5.4.2 のように  $d$  を変えて、養浜 5 万  $\text{m}^3/\text{yr}$  を実施した場合の 10 年後までの地形変化を予測した。各粒径に対応する平衡勾配は、筆者らがこれまでに検討した遠州灘浜松篠原海岸<sup>15)</sup>、湘南海岸<sup>16)</sup>、西湘海岸二宮大磯地先<sup>17)</sup>などの実態および計算条件を参考に定めた。具体的には  $1d_0=1$  mm では  $\tan \beta=1/10$ 、 $2d_0=2$  mm では  $\tan \beta=1/8$ 、 $5d_0=5$  mm では  $\tan \beta=1/5$ 、 $10\sim 150d_0=10\sim 150$  mm では  $\tan \beta=1/3$  と設定した。

Fig. 5.4.1 は  $Q_0=10$  万  $\text{m}^3/\text{yr}$  の右向き沿岸漂砂が連続的に流れている動的平衡海浜の等深線を示す。予測計算ではこれを初期地形とした。

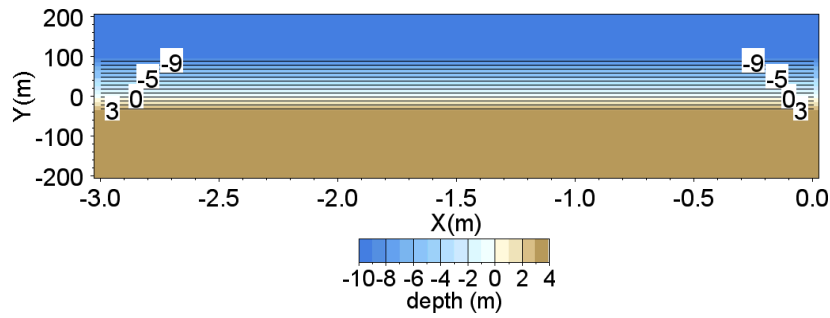


**Table 5.4.1** Calculation conditions

Numerical model	Contour-line-change model considering grain size change <sup>14)</sup>
Calculation domain	Rectangular area of 3 km length and 0.4 km width
Method	(1) Reproduction of dynamic equilibrium coast with constant longshore sand transport rate $Q_0 = 1.0 \times 10^5$ m <sup>3</sup> /yr (2) Prediction of bathymetric changes with no measures and beach nourishment using various grain sizes at a rate of $5 \times 10^4$ m <sup>3</sup> /yr
Initial bathymetry	(1) Straight parallel contours (2) Reproduced bathymetry
Incident wave conditions	Deep water wave height $H = 1.6$ m and wave period $T = 7$ s (energy-mean waves) Wave angle relative to initial shoreline: $\theta_w = -10^\circ$
Tide condition	M.S.L. 0.0 m
Grain size and equilibrium slope	Original $d_0 = 1$ mm with equilibrium slope of $\tan\beta = 1/10$ Cases 2-8: Table 2
Berm height and depth of closure	$h_R = 3$ m and $h_C = 9$ m
Depth range of calculation	Between $Z = 3$ m and $-9$ m
Mesh sizes	$\Delta X = 50$ m and $\Delta Z = 1$ m
Time intervals	$\Delta t = 1$ hr
Correspondence of real time and time steps	One year: 876 steps
Sand transport coefficients	Coefficient of sand transport $A = 0.0255$ so that longshore sand transport rate is $1.0 \times 10^5$ m <sup>3</sup> /yr Ozasa and Brampton's coefficient = 1.62 Ratio of coefficient of cross-shore sand transport relative to that of longshore sand transport $K_z / K_x = 0.15$
Depth distribution of sand transport	Cubic equation (Uda and Kawano, 1996)
Boundary conditions	(1) Right boundary: $q_x = 1.0 \times 10^5$ m <sup>3</sup> /yr, Left boundary: fixed shoreline as $dq_x/dx = 0$ , landward and seaward ends: $q_z = 0$ (2) $q_x = 0$ at right boundary
Critical slope of falling sand	1/2 on land and 1/3 on seabed
Nourishment conditions	Rate of beach nourishment: $Q_0 = 5 \times 10^4$ m <sup>3</sup> /yr Beach nourishment area: between $X = 0$ and 200 m, and $Z = 3$ and $-4$ m
Numerical method	Explicit finite difference method

**Table 5.4.2** Grain size and equilibrium slope

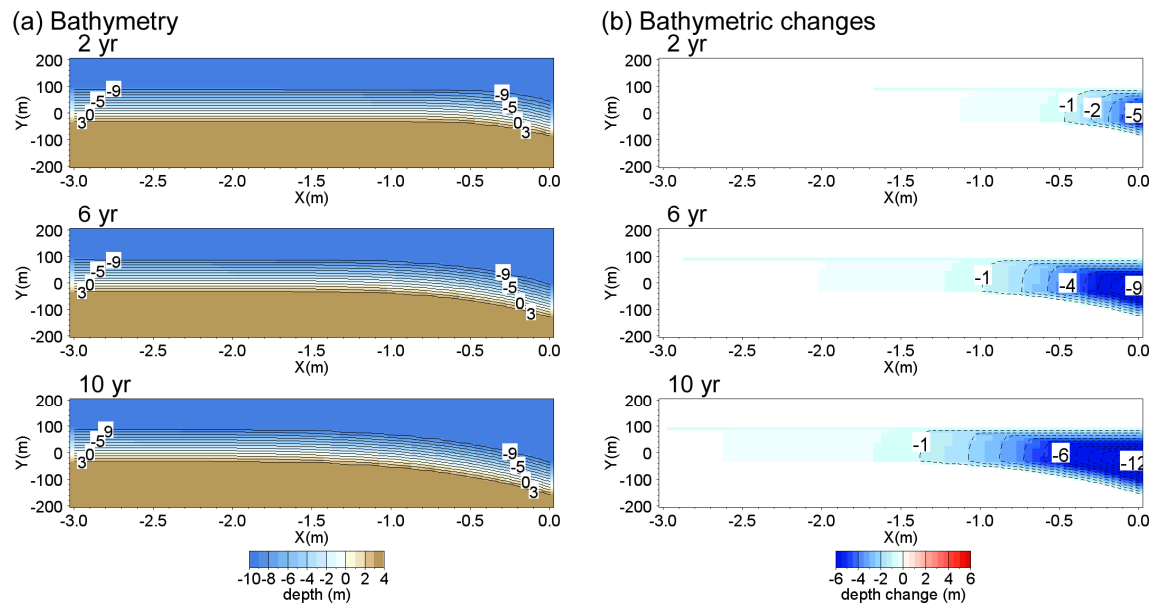
Case	Grain size $d$ (mm)	Equilibrium slope $\tan\beta$
1	No measure	
2	$150d_0 = 150$	1/3
3	$100d_0 = 100$	1/3
4	$50d_0 = 50$	1/3
5	$10d_0 = 10$	1/3
6	$5d_0 = 5$	1/5
7	$2d_0 = 2$	1/8
8	$1d_0 = 1$	1/10



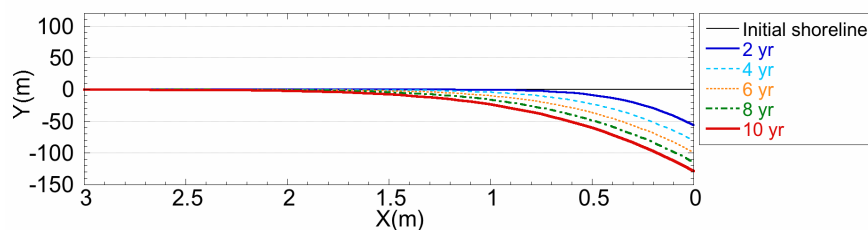
**Fig. 5.4.1** Bathymetry of dynamic equilibrium beach with constant leftward longshore sand transport  $Q_0$  of  $1.0 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{yr}$ .<sup>4)</sup>

## (2) 養浜なし

養浜を実施しないケース 1 の 10 年後までの予測結果と初期地形を基準とした 10 年後までの地形変化量を **Fig. 5.4.2** に示す。また汀線変化を **Fig. 5.4.3** に示す。ケース 1 の場合、左端からの沿岸漂砂が 0 になったため漂砂上手端から侵食が進み、砂の移動範囲の 3～9 m の全等深線が後退した。水深変化量より、時間経過とともに侵食域は下手側へと広がり、10 年後までに侵食域は沿岸方向に 2.5 km、最大地盤高低下量は -12 m に達した。



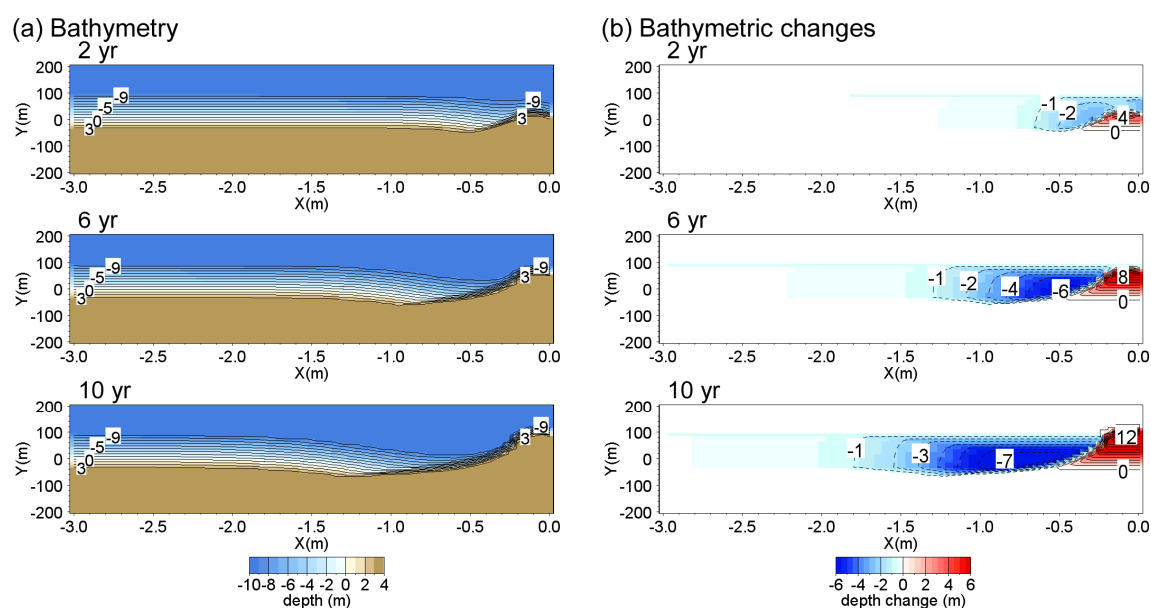
**Fig. 5.4.2** Predicted beach changes after 10 years in Case 1 with no measures.<sup>4)</sup>



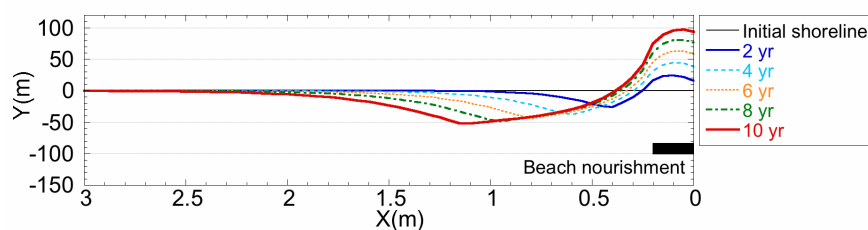
**Fig. 5.4.3** Predicted shoreline changes in Case 1.<sup>4)</sup>

### (3)現地粒径の 50～150 倍の大きさの養浜材

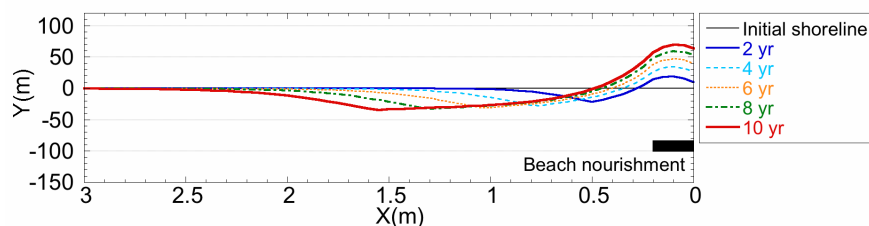
現地粒径の 150 倍の大きさの養浜材を投入したケース 2 の場合の予測地形と地形変化量、汀線変化量を **Fig. 5.4.4**, **Fig. 5.4.5** に示す。陸側には礫の集中的堆積域 (Gravel Body : GB) が形成された。GB は時間とともに大きくなるが、沿岸方向の広がりには狭く、その下手側では、時間とともに著しい侵食が進んだ。例えば、 $X=-1$  km の侵食量は  $-7$  m であり、ケース 1 の  $-2$  m に比べて大きい結果となった。つまり、GB によって下手側の侵食が助長されたといえる。このように、現地海浜の粒径に対し養浜材の粒径が著しく大きい場合、投入された養浜材は動きにくいいため、消波ブロックを設置した場合と同様その下手側で侵食が著しくなり、広い範囲で海岸保全を図ることはできない。同様な特徴は、**Fig. 5.4.6** に示すように、現地粒径の 50 倍の大きさの養浜材を投入したケース 4 までみられた。なお、養浜材の粒径が大きいほど鋭い楔状で汀線が後退し、また後退量も大きい。



**Fig. 5.4.4** Predicted beach changes after 10 years in Case 2 with beach nourishment using materials with grain size 150 times larger than the original grain size. <sup>4)</sup>



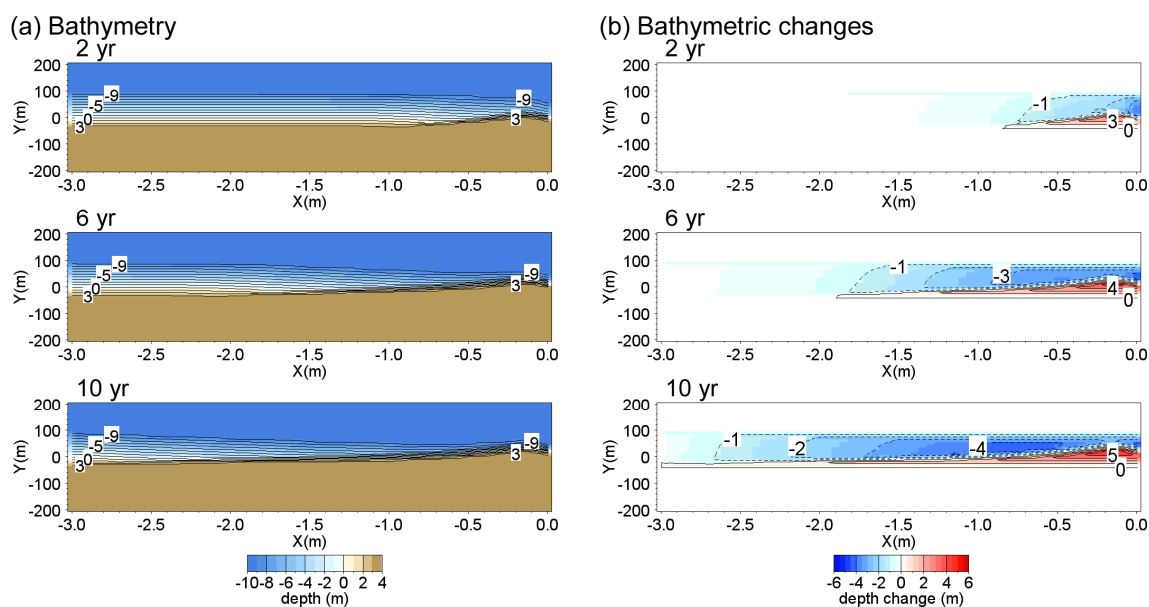
**Fig. 5.4.5** Predicted shoreline changes in Case 2. <sup>4)</sup>



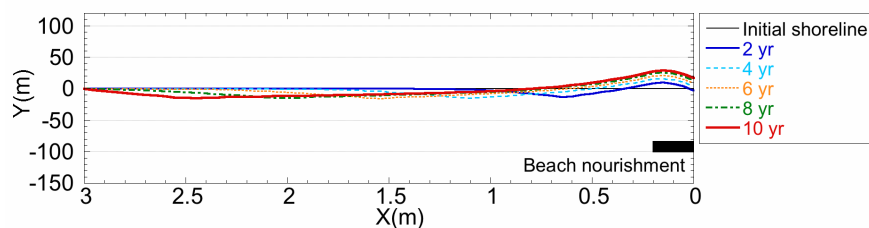
**Fig. 5.4.6** Predicted shoreline changes in Case 4 with beach nourishment using materials with grain size 50 times larger than the original grain size. <sup>4)</sup>

#### (4) 現地粒径の 10 倍の大きさの養浜材

現地粒径の 10 倍の大きさの養浜材を投入したケース 5 の場合の予測地形と地形変化量、汀線変化量を **Fig. 5.4.7, 5.4.8** に示す. この大きさであれば, GB は時間とともに沿岸方向に広がるが, 汀線前進を図ることができるのは上手側約 800 m 区間のみであり, その下手側では汀線が後退する結果となった.



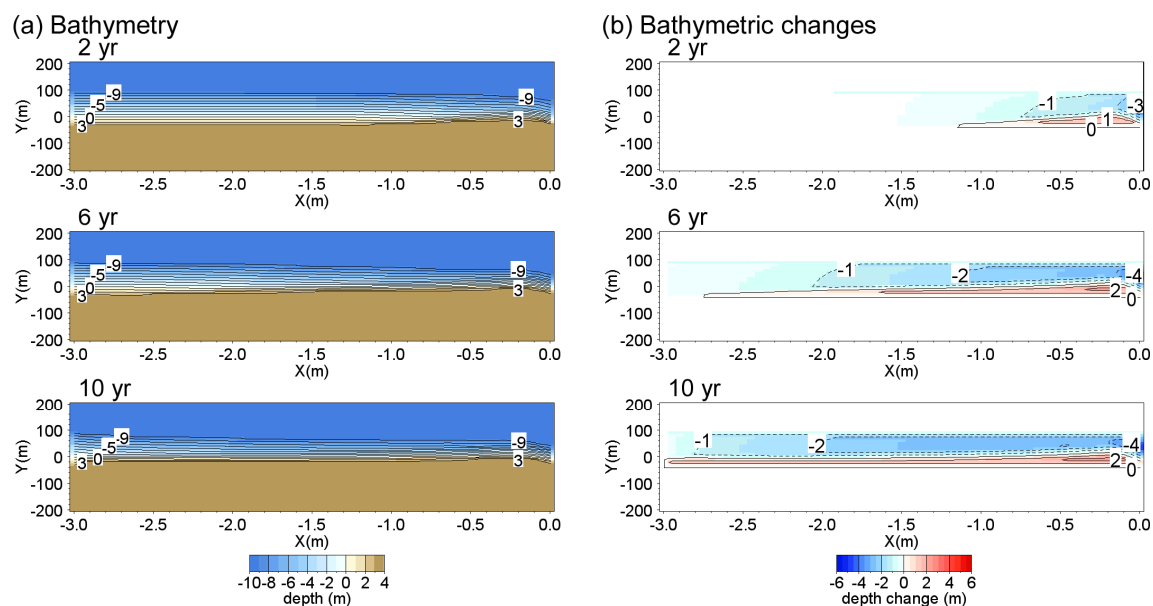
**Fig. 5.4.7** Predicted beach changes after 10 years in Case 5 with beach nourishment using materials with grain size 10 times larger than the original grain size. <sup>4)</sup>



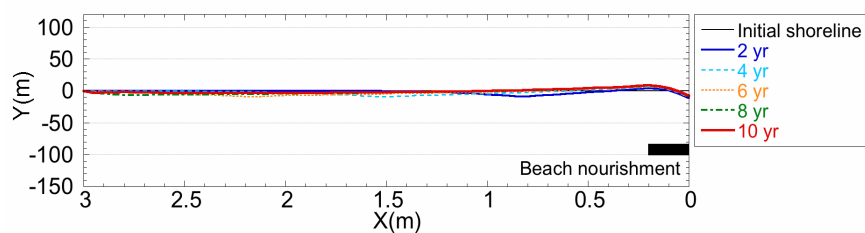
**Fig. 5.4.8** Predicted shoreline changes in Case 5. <sup>4)</sup>

### (5) 現地粒径の 5 倍の大きさの養浜材

現地粒径の 5 倍の大きさの養浜材を投入したケース 6 の場合の予測地形と地形変化量、汀線変化量を **Fig. 5.4.9, 5.4.10** に示す。現地粒径の 5 倍程度であれば、粒径・平衡勾配ともに小さいことから GB が広く沿岸方向に広がり、沿岸方向に細長い堆積域が形成され、全域の汀線を後退させずにほぼ維持することができた。



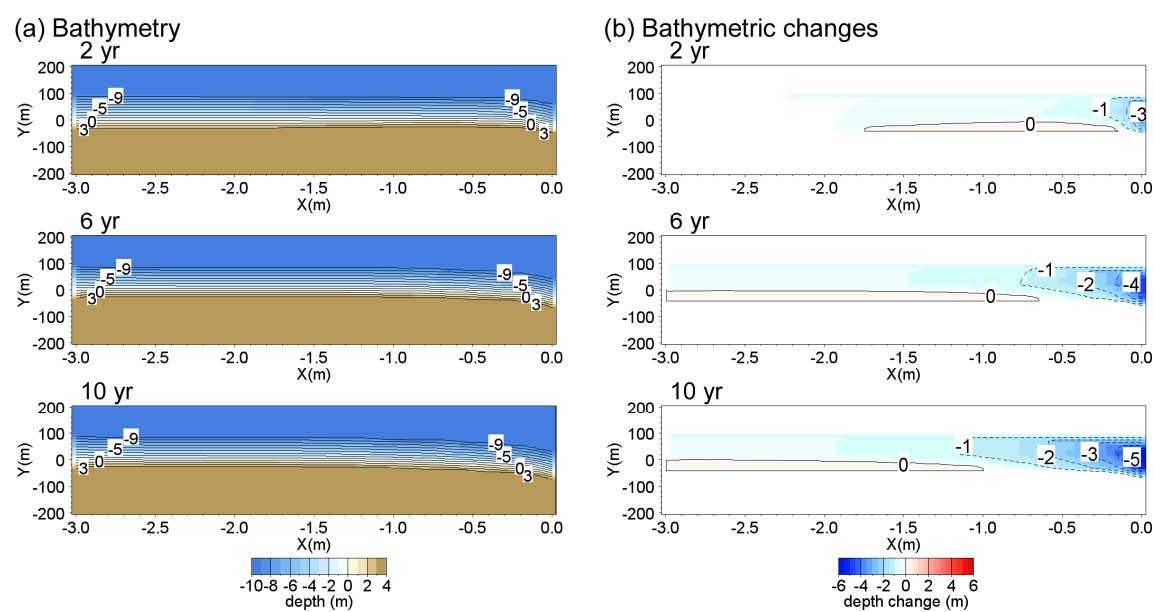
**Fig. 5.4.9** Predicted beach changes after 10 years in Case 6 with beach nourishment using materials with grain size 5 times larger than the original grain size. <sup>4)</sup>



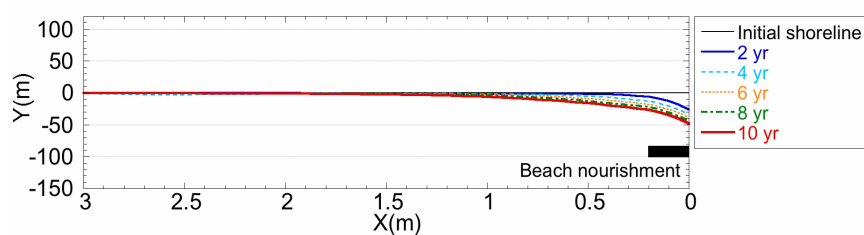
**Fig. 5.4.10** Predicted shoreline changes in Case 6. <sup>4)</sup>

# (6)現地粒径の 2 倍の大きさの養浜材

現地粒径の 2 倍の大きさの養浜材を投入したケース 7 の場合の予測地形と地形変化量、汀線変化量を Fig. 5.4.11, 5.4.12 に示す. ケース 1 に比べて侵食は軽減されるが, 上手側の保全を図ることができない.



**Fig. 5.4.11** Predicted beach changes after 10 years in Case 7 with beach nourishment using materials with grain size 2 times larger than the original grain size.<sup>4)</sup>

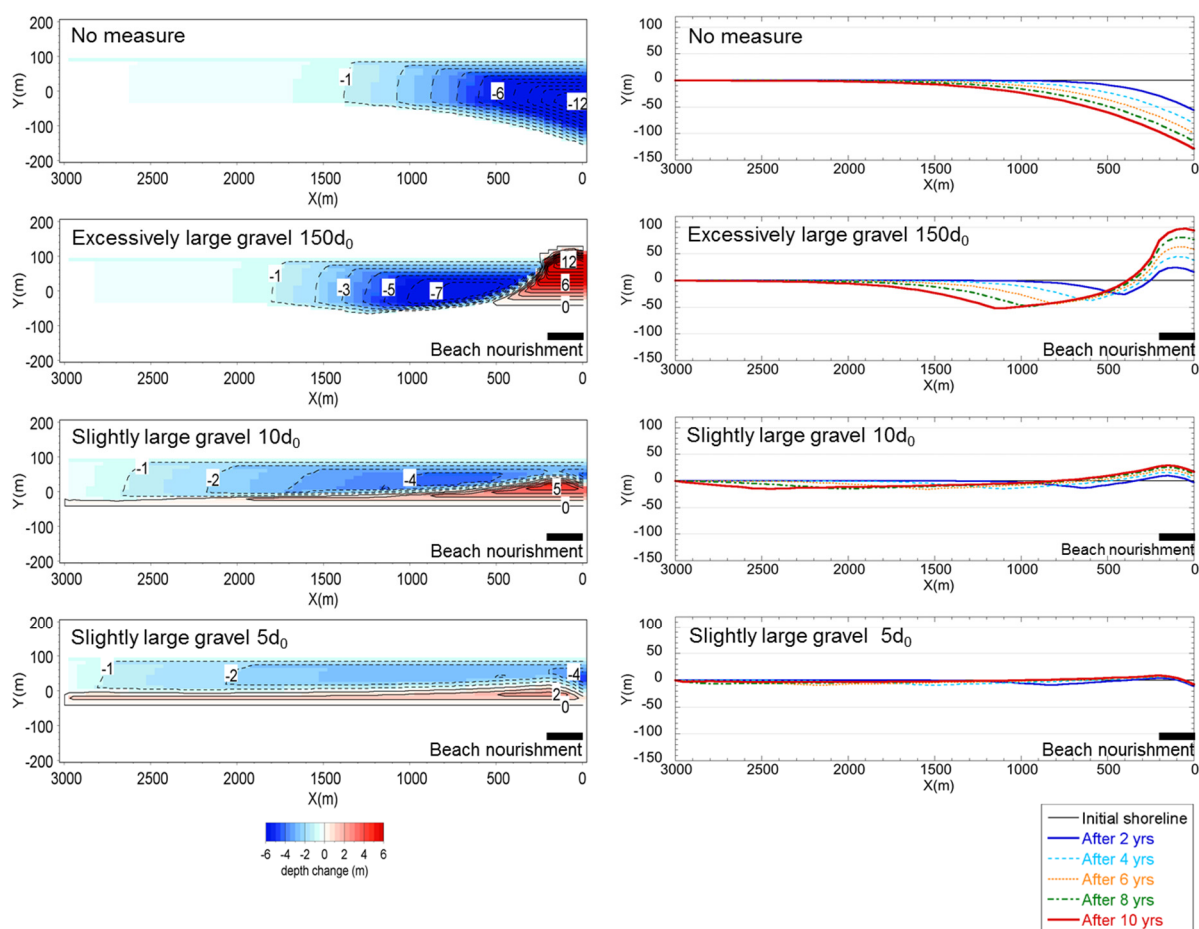


**Fig. 5.4.12** Predicted shoreline changes in Case 7.<sup>4)</sup>



## (7)まとめ

地形変化予測モデルによる検討結果より、一方向沿岸漂砂が卓越する動的平衡海浜において上手側からの沿岸漂砂が途絶えた場合、上手側から侵食が進む。その対策として養浜を行った場合、現地海岸の粒径に対して養浜材の粒径が大きいほど投入箇所付近の汀線維持には有効であるが、粒径が大きすぎると下手側海岸の侵食を助長することから、養浜材の粒径の選定が重要であることが改めて確認できた（**Fig. 5.4.13**）。

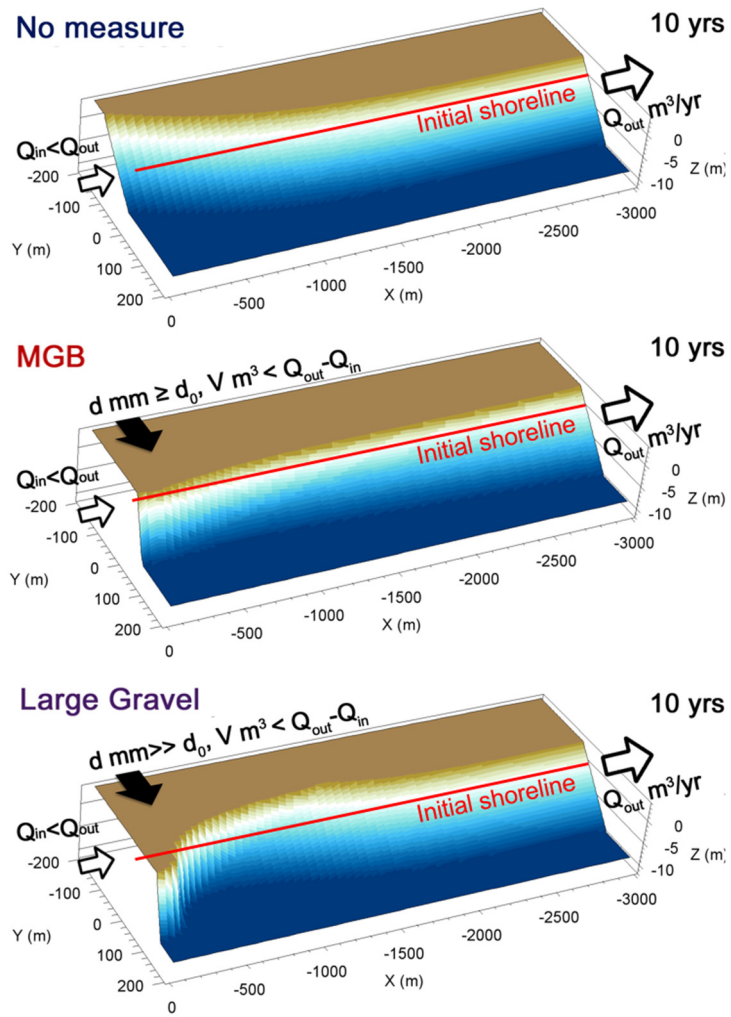


**Fig. 5.4.13** Prediction of Bathymetric changes and shoreline changes after 10yrs.

## 5.5. Moving Gravel Body 工法のコンセプト

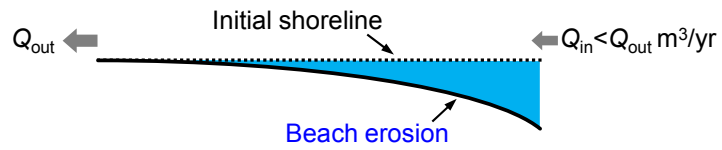
現地砂より粒径の大きな養浜材を用いると、放置と比較して最も侵食の著しい区域の保全を図ることは可能であるが、粒径が大き過ぎると養浜箇所下手側では新たな侵食が発生し、結果的に最も著しい侵食箇所を沿岸方向にずらすことになる (Fig. 5.5.1)。大粒径の礫を投入した箇所の手側隣接部では汀線が鋭い楔状に後退し、また前面水深も深く、防災上脆弱な区域が形成される。Moving Gravel Body 工法 (MGB 工法) は、現地粒径よりわずかに粗い粗粒材を含む養浜により、緩やかな海岸保全効果の発現を目指している。Fig. 5.5.2 は MGB 工法の概念図を示す。動的平衡海浜において上手側からの沿岸漂砂  $Q_n$  が下手側の  $Q_{out}$  よりも小さい状況下では、放置の場合上手側より侵食が進む (Fig. 5.5.2 (a))。この場合、足りない漂砂量  $Q_{out} - Q_n$  を現地海岸の底質  $d_0$  と同じ粒径  $d_1$  を用いて  $V_1$  だけ養浜すれば現状海浜の維持が図れる (Fig. 5.5.2 (b))。しかし沿岸漂砂量が大きい海岸にあつては、多くの場合養浜材の確保や経済的理由などから十分な養浜量を確保できず、その結果、放置に比べて侵食量は軽減するものの侵食の防止ができなくなる (Fig. 5.5.2 (c))。限られた養浜量  $V_2 < V_1$  の条件下において、現地海岸の底質  $d_0$  よりも小さい粒径を用いた場合養浜材は沖へ流出し、放置の場合と同様に侵食が起こる。 $d_0$  よりもわずかに大きい粒径  $d_2$  を用いた場合は保全区域の汀線を維持でき、また養浜区間下手側の侵食の程度が低減する (Fig. 5.5.2 (d))。一方、 $d_0$  より著しく大きい粒径  $d_3$  を用いた場合は、保全区域の汀線を前進させることはできるものの、下手側の侵食を助長することになる (Fig. 5.5.2 (e))。この場合、汀線後退とともに汀線沖も急深となり、この区間は防護上脆弱な海岸へと変化する。投入した養浜材が動きにくいことが要因であり、とくに著しく大きい粒径を用いた場合は、従来の消波ブロックによる保全対策による地形変化と類似した変化となる (Fig. 5.5.2 (f))。

以上のことから、海岸保全 (初期汀線の回復・維持) に効果的で、かつ下手側海浜へ悪影響を及ぼさない粒径は、現地粒径に対しわずかに大きい程度の材料となり (Fig. 5.5.2 (d))、この粒径を用いた養浜が MGB 工法のコンセプトに合致する。本研究で設定した計算条件の場合は、現地粒径に対し 5 倍程度の大きさの粒径を用いた場合が MGB 工法となる。

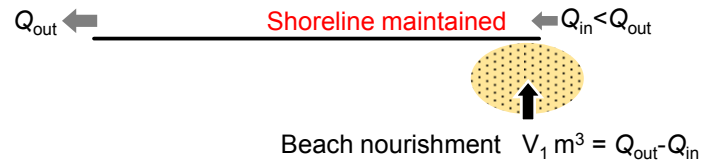


**Fig. 5.5.1** 3-dimensional images of the MGB method

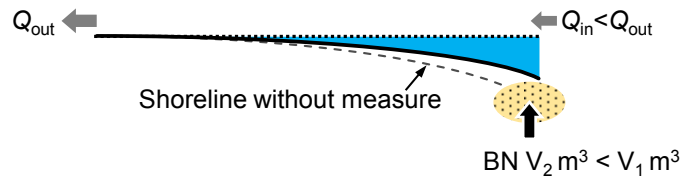
(a) No measure



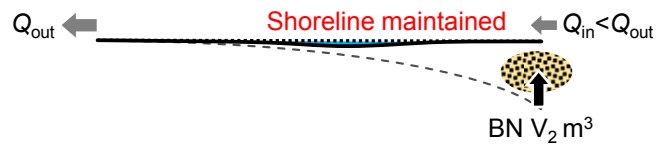
(b) Beach nourishment using same materials  $d_1 = d_0$



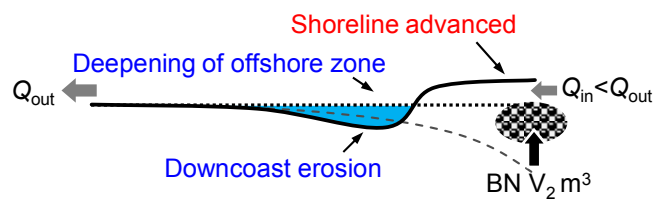
(c) Beach nourishment using same materials  $d_1 = d_0$ ,  $V_2 < V_1 \text{ m}^3$



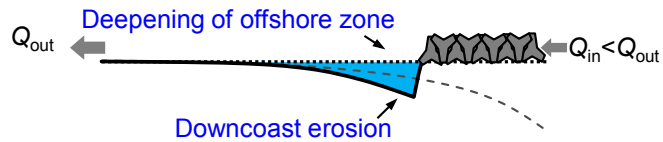
(d) **MGB** (Beach nourishment using slightly coarse materials  $d_2 \geq d_0$ )



(e) Beach nourishment using excessively coarse materials  $d_3 \gg d_0$



(f) Concrete armor units



**Fig. 5.5.2** Concept of Moving Gravel Body method. <sup>4)</sup>

## 5.6. 結言

Moving Gravel Body 工法 (MGB 工法) は、一方向沿岸漂砂が卓越する海岸において、現地粒径に対しわずかに大きい程度の材料を用いた養浜により、下手側海浜へ悪影響を及ぼさずに効果的に海岸保全 (初期汀線の回復・維持) を図る手法である。ここで、現地海岸の底質よりも粗い粒径を用いた養浜のうち、茨城県の神向寺海岸<sup>1)</sup>、神奈川県秋谷海岸<sup>18)</sup>はポケットビーチで行われたので MGB 工法には該当しない。一方、 $Q=1.0 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{yr}$  の一方向沿岸漂砂が卓越する富士海岸では、侵食対策として 1996 年より  $d_{50}=15 \sim 75d_0$  の礫による  $1.0 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{yr}$  程度の養浜が行われた。養浜材は波により摩耗しつつ下手側海岸へ流れ海岸保全が図られている点では MGB 工法の条件を満足している。しかし、礫の堆積域の下手側隣接部では、前浜・後浜に堆積している砂の供給が途絶えたため、後浜では高さ 2m 程度の浜崖が形成されるなど侵食が進んでいる。これは礫が大き過ぎるため、Fig. 5.5.2 (e)に近い条件であったと考えられる。

## 参考文献

- 1) 松浦健郎・宇多高明・諏訪義雄・山田浩次・福本崇嗣 (2009) : 砂浜の海岸保全施設指定に向けた粗粒材養浜の有効性の検討, 海洋開発論文集, 第 25 巻, pp.1119-1124.
- 2) Kumada, T., T. Uda and T. Ishikawa (2009): Theory and field test of beach nourishment using coarse sand and gravel, Proc. Coastal Dynamics 2009, Paper No. 75, pp. 1-1.
- 3) 宇多高明・石川仁憲・宮原志帆・芹沢真澄 (2011) : Moving Gravel Body 工法の提案, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.67, No.2, p.I\_661-I\_665.
- 4) Ishikawa, T., Uda, T. and Miyahara, S. 2012. Moving gravel body method to control downcoast erosion, Proc. 33rd ICCE, management.40, pp. 1-14.
- 5) 宇多高明, 石川仁憲, 三波俊郎, 青葉佳宏, 大井戸志朗 : 静岡県浜松篠原海岸における粗粒材養浜後の地形変化実態, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.70, No.2, p.I\_691-I\_695, 2014.
- 6) Ishikawa, T., Uda, T., San-nami, T. and Furuike, K. 2015. Verification of effect of gravel nourishment on Hamamatsu-shinohara coast, Japan, Coastal Sediments '15, CD-ROM, No. 38. pp. 1-14.
- 7) 宇多高明・石井 隆・内田光一・甲賀 肇・影山安秀・古池 鋼・石川仁憲 (2006) : 遠州灘海岸における長期的海浜変形予測と養浜の効果検討, 海岸工学論文集, 第 53 巻, pp. 666-670.
- 8) 宇多高明・吉添高兆・町井 靖・山本剛史・古池 鋼・芹沢真澄・石川仁憲 (2007) : 粒径を考慮した等深線変化モデルによる細砂・粗砂養浜の効果検討, 海岸工学論文集, 第 54 巻, pp. 641-645.
- 9) 石川仁憲・宇多高明・三波俊郎 (2010) : 粗粒材養浜時の海浜の質的变化と礫の移動特性, 海洋開発論文集, 第 26 巻, pp. 1077-1082.
- 10) Ishikawa, T., T. Uda and T. San-nami. 2011. Effect of beach nourishment using gravel and tracking movement of gravel, Asian and Pacific Coasts 2011, Proc. 6th International Conf., pp. 191-198.
- 11) 宇多高明・田代洋一・石川仁憲・古池 鋼・三波俊郎・芹沢真澄 (2010) : 混合粒径土砂の盛土

- 養浜時の広がり予測, 海岸工学論文集, 第 57 巻, pp. 651-655.
- 12) 筒井保博・岡村和久・熊切良行・三原武士・宇多高明・三波敏郎・宮原志帆・芹沢真澄・石川仁憲 (2011): 富士海岸 (富士川河口～田子の浦港間) の海浜変形の実態と予測, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.67, No.2, p.I\_601-I\_605.
  - 13) 國村一郎, 丹羽秀一, 熊切良行, 宇多高明, 石川仁憲, 三波俊郎: 富士海岸の吉原工区における礫養浜の効果検証, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.70, No.2, p.I\_701-I\_705, 2014.
  - 14) Uda, T., and M. Serizawa. 2010. Model for predicting topographic changes on coast composed of sand of mixed grain size and its applications (Chap. 16), pp. 327-358, in 'Numerical simulations-examples and applications in computational fluid dynamics' Angermann, L. ed., INTEC.
  - 15) 宇多高明・田代洋一・石川仁憲・古池 鋼・三波俊郎・芹沢真澄 (2010): 混合粒径土砂の盛土養浜時の広がり予測, 海岸工学論文集, 第 57 巻, pp.651-655.
  - 16) 石川仁憲・宇多高明・古池 鋼・鮫島 強・吉岡 敦 (2010b): 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, 海岸工学論文集, 第 57 巻, pp.641-645.
  - 17) 元永 秀・丸山將吾・磯貝朋之・宇多高明・宮原志帆・芹沢真澄・石川仁憲 (2010): 高波浪時における中砂成分の選択的流出に起因する海浜変形の再現, 海岸工学論文集, 第 57 巻, pp.581-585.
  - 18) 宇多高明, 小林昭男, 篠原大起, 野志保仁, 遠藤将利: 秋谷海岸における礫養浜の追跡調査, 日本沿岸域学会研究討論会 2009 講演概要集, No.22, pp.95-98, 2009.

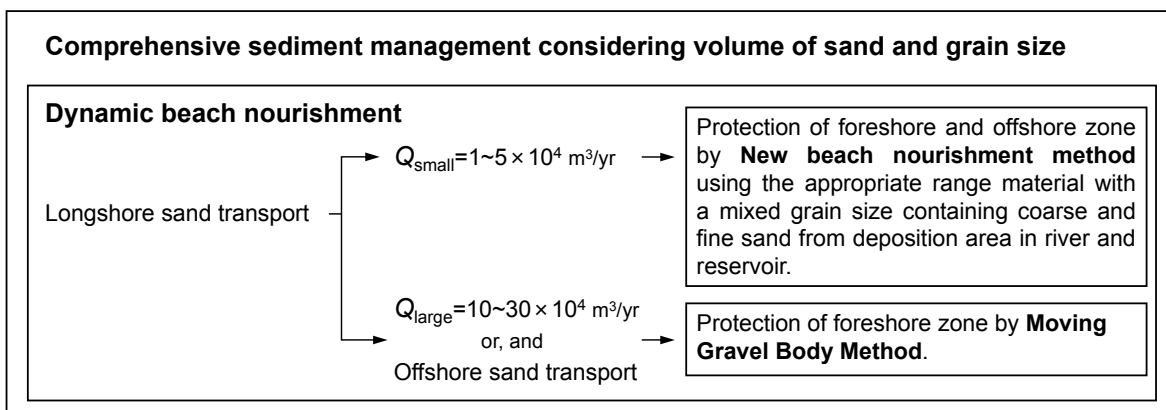
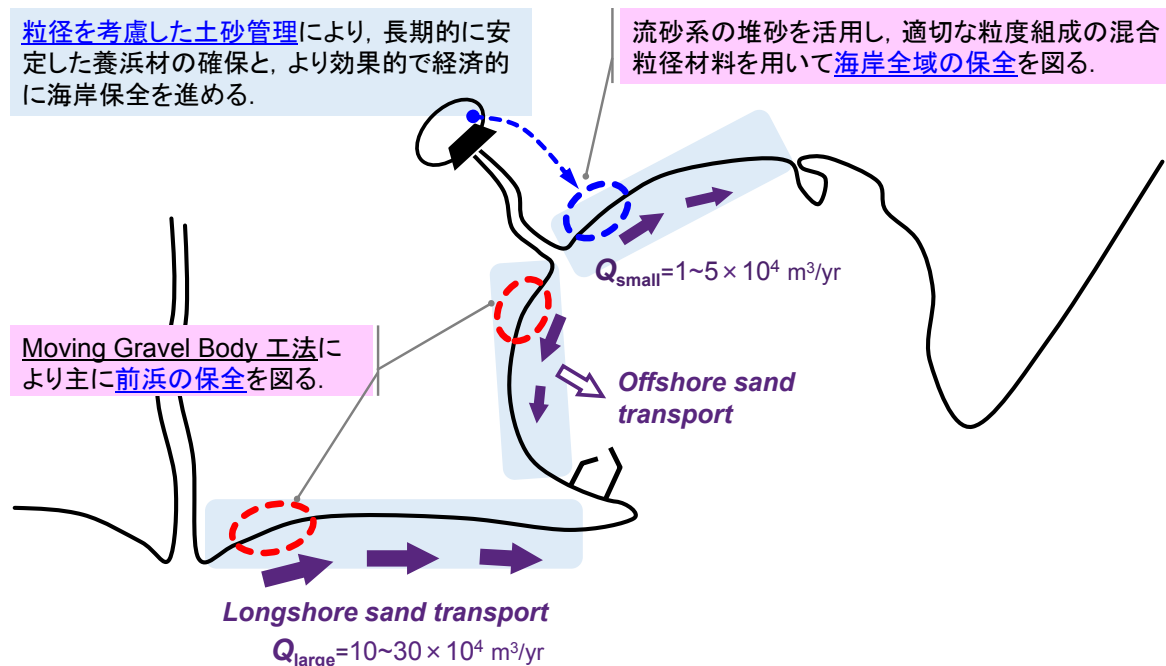


## 6. 結論

本研究では、まず海岸保全施設としての砂浜の基本的な考え方をとりまとめた。次に、砂浜による海岸保全を図るための新たな土砂管理手法を提案し、湘南海岸を例に、粒径を考慮した新しい土砂動態の解析と土砂管理計画の検討方法を取りまとめた。また、より効果的、かつ経済的な新しい養浜手法として、流砂系の土砂連続性の観点に基づき、海岸への土砂供給源であった河川（ダム）の堆砂を活用し、適切な粒度組成の混合粒径材料を用いて前浜だけでなく沖浜も含めた海岸全域の保全を図る養浜手法を提案した。さらに一方向沿岸漂砂が卓越する海岸における効果的な前浜の保全手法として、新たな養浜手法である **Moving Gravel Body** 工法を提案した。

これらの研究結果は **Fig. 6.1** に示すように整理できる。まず一方向沿岸漂砂が卓越する海岸において動的養浜を行う場合、その沿岸漂砂量によって養浜方法を選択する。内湾など沿岸漂砂量が小さい場合は、流砂系の堆砂を活用し、粒度組成の適正範囲を設定して海岸全域の保全を図る。一方、外洋に面し、沿岸漂砂量が大きい海岸、もしくは海底谷が近接し、海浜砂の沖への流出がある海岸の場合は、防護を最優先とし、**Moving Gravel Body** 工法により主に前浜の保全を図る。そして、長期的に安定した養浜材の確保と、より効果的で経済的に海岸保全を進めるために、一連の漂砂系（流砂系）を対象に、粒径を考慮した土砂管理を行う。結果、将来に渡って砂浜による海岸保全を図ることができる。先に述べたように、従来の構造物による侵食対策では、時間の経過とともに侵食域が構造物の下手側へと広がり、問題解決を先送りするのみで、抜本的な対策ではない。したがって、自然海浜をできる限り良好に保ち、長期的に海岸保全を進めるためには、本研究で提案した方法が有効である。

以下に、本研究で新たに提案した「砂浜による海岸保全を図るための土砂管理手法」、「適切な混合粒径材料を用いて海岸全域の保全を図る新たな養浜手法」、「**Moving Gravel Body** 工法」について要約する。



**Fig. 6.1** Concept of shore protection by comprehensive sediment management considering volume of sand and grain size and new beach nourishment methods.

## 6.1. 砂浜による海岸保全を図るための土砂管理手法

海岸侵食が進む海岸において、河川からの土砂供給が期待できない状況で、将来にわたって計画的、かつ確実に砂浜による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。本研究では、砂浜による海岸保全を図るための新たな土砂管理手法を提案し、粒径を考慮した土砂動態の解析手法や土砂管理計画の検討方法について、相模川河口から江ノ島の間広がる延長 11 km の湘南海岸を例にとりまとめた。海岸の土砂動態について、従来は量のみで表されていたが、本研究では、量だけでなく質（粒径）に注目し、その解析手法を提案し、粒径を考慮した土砂動態（土砂収支）を明らかにしたことが新しい<sup>1)2)</sup>。また、このような粒径を考慮した広域の土砂管理は、従来にない新しい手法であり、空間的に粒径分布をもつ砂浜の海岸保全を図るためには、必要な新たな土砂管理手法である<sup>3)4)</sup>。

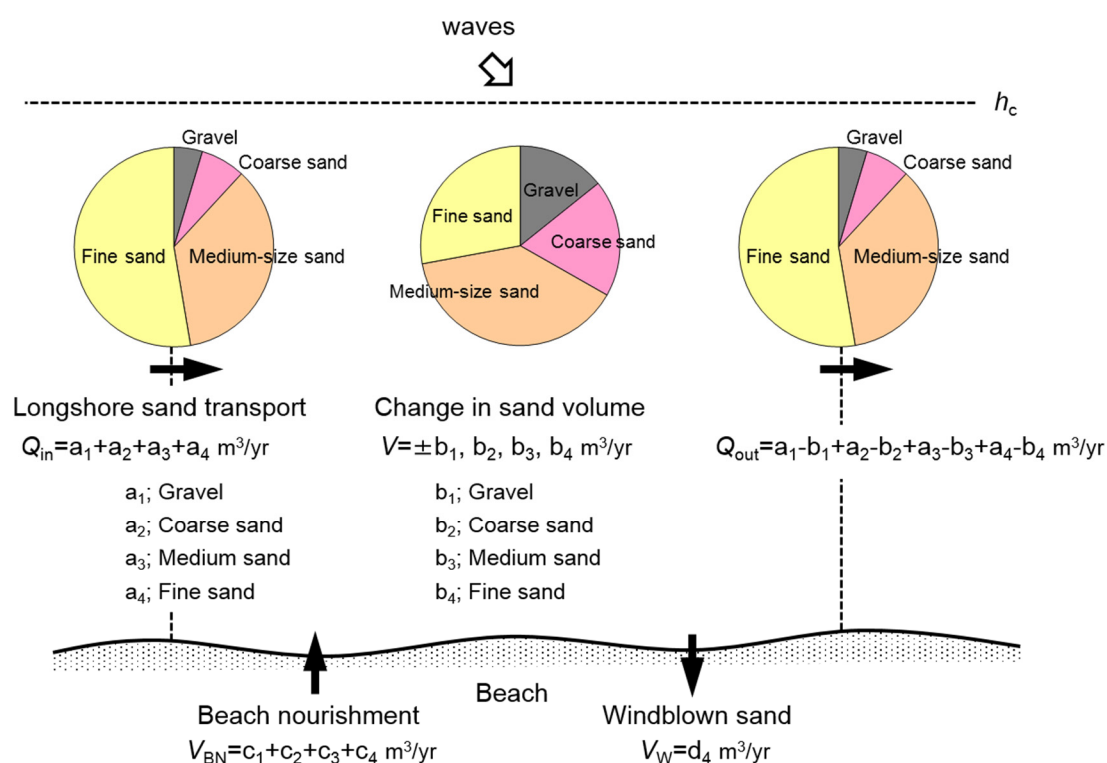


Fig. 6.1.1 New method of sand budget analysis considering grain size.

## 6.2. 適切な混合粒径材料を用いて海岸全域の保全を図る新たな養浜手法

より効果的かつ経済的な新たな養浜手法として、流砂系の土砂連続性の観点に基づき、本来、海岸への土砂供給源であった河川の堆砂を活用し、適切な粒度組成の混合粒径材料を用いて、前浜だけでなく沖浜も含めて海岸全域の保全を図る手法について提案し、神奈川県茅ヶ崎中海岸を例に、現地データの解析や数値計算による養浜手法の検討方法を取りまとめた。また、実際に流砂系の堆砂を活用して、適正範囲内の養浜材を用いた継続的な養浜が行われている茅ヶ崎中海岸では、前浜だけでなく沖浜も含めた海岸全域の保全が図られつつあることから<sup>5)6)7)8)</sup>、新たな養浜手法は、海岸保全手法として有効であると評価できた。従来の養浜では、多くの場合、ダムや河道の浚渫材を、コストをかけて分級し海岸へ投入していたが、養浜材の適正範囲を示し、その範囲内であれば直接投入しても海岸保全に効果的であることを示したことも新しい<sup>9)10)11)</sup>。長期的に砂浜を保全していくうえで、コストを抑えた本手法は、動的養浜を実施している各地の海岸で活用できると考えられる。

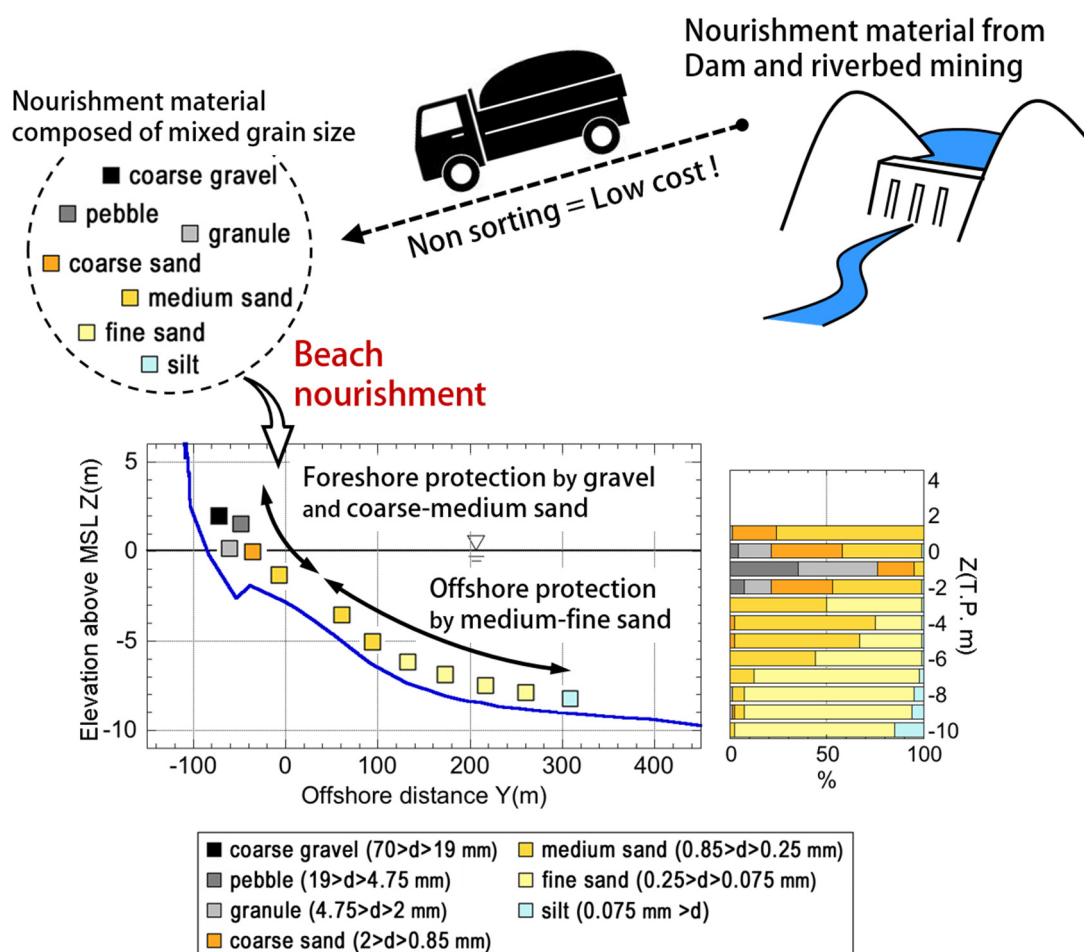


Fig. 6.2.1 Concept of new beach nourishment method.

### 6.3. Moving Gravel Body 工法

一方向沿岸漂砂が卓越する海岸において、現地の底質粒径に比べて最大 100 倍、75 倍とほるかに大きい粗粒材を用いた養浜が継続的に行われている遠州灘浜松篠原海岸と静岡県富士海岸を例に、養浜後の実態解析を行い、その結果を基に数値モデルを用いて現地粒径と粗粒材の大きさの違いによる保全効果を調べ、新たな養浜手法として Moving Gravel Body 工法 (MGB 工法) を提案した。この工法は、一方向沿岸漂砂が卓越する海岸において、現地粒径に対し 5 倍程度のわずかに大きい粒径の養浜材と、沿岸漂砂量に対して少ない養浜量により、下手側海浜へ悪影響を及ぼさずに効果的に海岸保全（初期汀線の回復・維持）を図る手法である<sup>12)13)</sup>。ここで、浜松篠原海岸では、粗粒材により前浜が著しく拡幅したものの、30 万  $\text{m}^3/\text{yr}$  の西向き沿岸漂砂が卓越するなかで、天竜川からの供給土砂量の激減により細粒分の供給がないため沖合で侵食が進んでいる<sup>14)</sup>。しかしながら、長期にわたって大量の細粒分の調達、投入は現実的ではない。一方、10 万  $\text{m}^3/\text{yr}$  の東向き沿岸漂砂が卓越する富士海岸では、主に細粒分が選択的に波による地形変化の限界水深以深に流出し、侵食が進んでいるが<sup>15)</sup>、限られた予算において確実に海岸保全を図るためには、流出する材料の投入よりは前浜に歩留る材料を投入すべきである。したがって、MGB 工法は、このように沿岸漂砂量が多い海岸や細粒分の沖への流出がある海岸において、より効果的かつ経済的に海岸保全を図る手法として有効である。

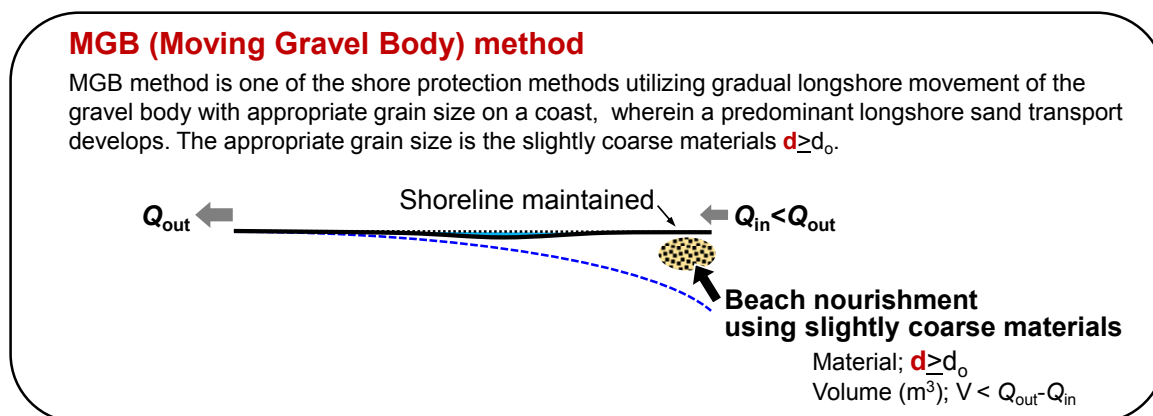


Fig. 6.3.1 Concept of Moving Gravel Body method.

### 参考文献

- 1) 宇多高明, 青島元次, 鮫島 強, 吉岡 敦, 三波俊郎, 石川仁憲: 粒径を考慮した土砂収支検討-湘南海岸の例, 海岸工学論文集, 第 55 巻, pp.726-730, 2008.
- 2) 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, pp. 1-12.

- 3) 石川仁憲, 宇多高明, 古池 鋼, 鮫島 強, 吉岡 敦: 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, 海岸工学論文集, 第 57 巻, pp.641-645, 2010.
- 4) Ishikawa, T., Uda, T., Furuike, K. and Yoshioka, A. 2011. Regional sediment management considering volume of sand and grain size, Coastal Sediments '11, pp. 2033-2046.
- 5) 石川仁憲・宇多高明・青島元次・吉岡敦・三波俊郎: 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, 2008.
- 6) 宇多高明・石川仁憲・三波俊郎・湖内真帆・進藤 豊・和田昌明: 定点カメラ画像の判読と幾何補正法による養浜効果の定量的測定, 海岸工学論文集, 第 57 巻, pp.591-595, 2010.
- 7) 石川仁憲, 三波俊郎, 宇多高明, 細川順一, 和田昌明: 茅ヶ崎中海岸における養浜の海岸保全効果の検証, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, p.I\_686-I\_690, 2012.
- 8) Ishikawa, T., T. Uda, T. San-nami and J. Hosokawa. 2013. Verification of shore protection effect of beach nourishment on Chigasaki coast, Asian and Pacific Coasts 2013, Proc. 7th International Conf., pp. 1-8.
- 9) 宇多高明, 青島元次, 山野 巧, 吉岡 敦, 三波俊郎, 石川仁憲: 神奈川県茅ヶ崎中海岸の事例にみる養浜の考え方, 海洋開発論文集, 第 23 巻, pp.1057-1062, 2007.
- 10) 宇多高明, 青島元次, 山野 巧, 吉岡 敦, 古池 鋼, 石川仁憲: 茅ヶ崎海岸における粒径を考慮した養浜工の効果予測, 海岸工学論文集, 第 54 巻, pp.631-635, 2007.
- 11) Yoshioka, A., T. Uda, G. Aoshima, K. Furuike and T. Ishikawa. 2008. Field experiment of beach nourishment considering changes in grain size and prediction of beach changes Proc. 31st ICCE, pp.2694-2706.
- 12) 宇多高明・石川仁憲・宮原志帆・芹沢真澄: Moving Gravel Body 工法の提案, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.67, No.2, p.I\_661-I\_665, 2011.
- 13) Ishikawa, T., Uda, T. and Miyahara, S. 2012. Moving gravel body method to control downcoast erosion, Proc. 33rd ICCE, management.40, pp. 1-14.
- 14) Ishikawa, T., Uda, T., San-nami, T. and Furuike, K. 2015. Verification of effect of gravel nourishment on Hamamatsu-shinohara coast, Japan, Coastal Sediments '15, CD-ROM, No. 38. pp. 1-14.
- 15) 國村一郎, 丹羽秀一, 熊切良行, 宇多高明, 石川仁憲, 三波俊郎: 富士海岸の吉原工区における礫養浜の効果検証, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.70, No.2, p.I\_701-I\_705, 2014.



## 謝 辞

本論文をまとめるにあたり，終始ご指導をいただいた日本大学理工学部海洋建築工学科教授の小林昭男先生に深く感謝申し上げます．学位論文の査読，審査において，貴重なご指導とご助言をいただいた日本大学理工学部土木工学科教授の前野賀彦先生に心より感謝申し上げます．

一般財団法人土木研究センターなぎさ総合研究室長兼日本大学理工学部海洋建築工学科客員教授の宇多高明先生には，砂浜による海岸保全に関する研究を始めた 2005 年から 10 年間にわたって終始ご指導をいただき，現地踏査の方法から海浜変形の分析，そして物事の本質を捉えた思考，さらには研究が実際に問題解決に役立つことが重要であるという海岸工学者としての姿勢まで多くのことを学ばせていただいた．また，数多くの論文作成と国内・国際学会発表に多大なご支援とご指導をいただいた．ここに深く感謝申し上げます．

本研究での地形変化予測モデルによる数値計算では，海岸研究室有限会社の芹沢真澄博士，古池 鋼氏，宮原志帆氏に多くのご助言とお力添えをいただいた．粒径を考慮した土砂動態の解析など，現地データの解析では，海岸研究室有限会社の三波俊郎氏に多くのご助言とお力添えをいただいた．また，芹沢真澄博士，古池 鋼氏，三波俊郎氏からは，長年，海岸侵食や海岸保全について議論を重ね，実務と研究を通して多くのことを学ばせていただいた．ここに皆様に心より感謝申し上げます．

当時神奈川県職員であった青島元次氏，そして現神奈川県職員の細川順一氏，吉岡 敦氏をはじめ神奈川県職員の方々には，本研究を進める上で，海岸管理者としての様々な貴重なご意見をいただいた．ここに心より感謝申し上げます．また，本研究の一部に，神奈川県，静岡県，国土交通省中部地方整備局沼津河川国道事務所との共著論文を引用させていただいた．ここに深く御礼申し上げます．