

博士論文

トレンチ調査と水理実験に基づく砂礫混合海浜の
形成過程の解明と効率的な養浜手法に関する研究

野口賢二

論文要旨

我が国では、沿岸漂砂の土砂収支のバランスが崩れたことにより砂浜の侵食が深刻な状況へ進み、自然の力による回復が期待できない海岸が続出している。このような海岸では、漂砂制御施設のみの侵食対策には限界があり、養浜を組合せた対策が必要となる。

養浜と漂砂制御施設を組合せた対策を合理的に進めるためには、砂礫混合海浜の形成過程の理解が不可欠である。砂礫混合海浜の地形変化に関する多くの研究は、表面底質や推定された現象に基づく変化の予測にとどまっている。本研究では、形成過程を解明するためのトレンチ調査を実施して、遡上する砂礫の視点から堆積構造を分類するとともに、いくつかの気象擾乱による波浪外力と堆積層形成を対応づけることができた。さらに、地形変化や堆積状況の相互分析から、砂礫混合海浜が耐波侵食性を有していることが思料された。これら形成過程および耐波侵食性は、水理模型実験でも確認され、この特性を活用できる砂礫混合養浜が効率的な養浜手法であることを示した。

本研究は、砂礫混合海浜の形成過程を解明するためのトレンチ調査を世界的に初めて実施し、得られた形成過程を水理模型実験により実証したもので、学術的・技術的な価値が高い。

第1章では、養浜材料を現地粒度より大きくすることの危うさと総合的な土砂管理の観点から本研究の意義を示し、既往研究の問題点を示した。加えて、我が国における海岸侵食対策の変遷と養浜導入の経緯とその成果を具体事例により示し、養浜が有効であり、海岸保全の線的防護から面的防護への革新に続く新たなフェイズを支える技術であることを示した。

第2章では、砂礫混合海浜の形成過程を解明するためのトレンチ調査の結果を示した。トレンチ調査地点は、実施順に静岡・清水海岸（安倍川流砂系）、富士海岸（富士川流砂系）、浜松篠原海岸（天竜川流砂系）の3海岸で堆積状況により3地先を選択した。トレンチ調査は、波の遡上帯で岸沖方向へ連続的に砂と礫の堆積状況を把握するためのもので、トレンチ掘削、層理面の把握、堆積層底質のサンプリングと粒度分析、層理面と定期海浜断面測量の対応付けで構成される。さらに、浜松篠原海岸では、定期海浜断面測量結果と波浪観測データから堆積層を形成した外力を特定することに成功した。また、定期海浜断面測量結果から得られた汀線変化量とトレンチ調査で得られた堆積状態を総合して耐波侵食性の比較を行った。その結果、砂礫混合養浜を実施することで、耐波侵食性に対する効率を高め得ることが明らかとなった。また、層理面の把握から堆積状態を大きく7つに分類した。

第3章では、第2章で見出された堆積構造の形成メカニズムが耐波侵食性を高める鍵となっていると推定し、砂礫の堆積メカニズムを再現する基礎的な実験を行った。実験では、固定床に養浜盛土を設置し、規則波を作用させて砂礫の挙動と形成される地形を観察した。その結果、砂と礫が異なる移動形態をとることによる地形形成の役割の差異を明らかにした。これに基づき礫が砂の流出を防ぐ7つの仕組みがあることを示した。これは下層の砂を礫が覆い砂を拘束する機能となる。一方で、砂は堆積性の波において岸

側へ移動し海浜を回復させる機能を有することを示した．これらを総合して，盛土の侵食，汀線の後退，海浜回復性の観点で材料の違いによる養浜の効率を評価し，砂礫混合養浜の耐波侵食性が高いことを示した．

以上を総合して第4章で結論として，砂礫混合養浜が海浜の耐波侵食性の向上に有効であることを示した．また，本研究の成果を養浜の設計に活用するために残されている課題と対策を整理した．本研究の成果により，効率的な養浜が実現するとともに養浜実施のハードルが低くなることにより，総合的土砂管理が海岸にとって現実的となることで，良好な海岸環境を後世へ継承できる海岸が増えることが期待できる．

A Study on Sand-Gravel Beach Formation and Efficient Nourishment Based on Beach Trench Survey and Laboratory Experiments

Many Japanese coasts are facing serious erosion, which are mostly developed by a deficit in the coastal sediment transport budget, and thus cannot be recovered by natural processes. Since shore protection structures alone cannot compensate the deficit in the sediment budget, the countermeasures must be combined with the beach nourishment works. In order to appropriately design the beach nourishment works, it is necessary to understand the formation process of sand and gravel mixed beach since many Japanese coasts are characterized by the presence of gravels supplied from rapid rivers.

Most of the existing field studies for sand gravel mixed beach morphology have been based on limited surveys of movement and grain size characteristics of surface sediments. Investigations on the sub-surface sediments are essential to understand the interaction of heterogeneous sediments and to establish the optimum design of sand-gravel nourishment.

In this study, a series of beach trench surveys were conducted on three coasts in order to reveal sedimentation processes. Sub-surface sediment layers were then classified in terms of the grain size and the sedimentary structure of the sand and gravel. The relationship between the formation processes of the deposit layers and hydraulic parameters (wave height, wave period and tide) was investigated.

From the mutual analysis of the shoreline changes and deposition situations observed in the field, sand and gravel mixed beach is found to be effective to reduce the coastal erosion by wave action. The deposit layer formation processes and the erosion reduction property against the wave action were also confirmed by laboratory experiments of sand and gravel nourishment. By combining the analyses in the field and in the laboratory experiments, it was shown that the sand and gravel mixed nourishment was effective to reduce the coastal erosion.

The highlight of this study is found in unique beach trench surveys as well as in the comparisons between the field survey and the laboratory experiments.

Chapter 1 describes the significance of this study on the basis of the integrated sediment control strategy in the watershed. The significance of the optimum sediment size is discussed in context with increasing the efficiency of nourishment. In addition, literature surveys are introduced.

In order to describe the background of this study, the history of coastal erosion countermeasures is summarized with a special attention to beach nourishment introduction in Japan. The effectiveness of the beach nourishment was explained through practical examples. Coastal protection in Japan has evolved from “line-defense” that sets up seawalls and revetments on the landward boundary of the shore to “plane-defense” that is composed of several onshore and offshore structures. The role of beach nourishment is introduced in the history of shore protection as a key technology in a new phase on the integrated measures against beach erosion.

Chapter 2 describes the gravel mixed beach formation processes revealed by trench surveys. Trench survey was carried out in the Shizuoka-Shimizu Coast (sediments from the Abe River), the Fuji Coast (sediments from the Fuji River) and the Hamamatsu-Shinohara Coast (sediments from the Tenryu River). Three trenches were excavated respectively on the three coasts, nine trenches in total, at various locations to represent various sediment supply conditions.

The purpose of the trench survey was to investigate the sand and gravel movement and the formation process of beach in the swash zone to the backshore. The trench survey is composed of trench excavation, deposit layer tracing, grain size analysis, sediment layer dating by radiocarbon chronology and comparison between deposit layers and periodic cross-shore profile measurements. Sedimentary structures of the deposit layer were classified into seven types.

Furthermore, on the Hamamatsu-Shinohara coast, connections between storm events and deposited layers were demonstrated by periodic cross-shore profile surveys and wave observation data.

Beach endurance against to the wave action was comprehensively compared between gravel nourished beach and almost native beach in view of the deposited states. In comparison, shoreline variations, which were obtained

from periodic cross-shore profile survey results, were introduced. As a result, the sand gravel mixed nourishment was found to hold a high efficiency for beach endurance against to the wave action.

Chapter 3 describes the laboratory experiments to simulate the sand and gravel movement and deposition mechanisms that were observed in trench surveys in the field. In the experiments, the change of deposit layer was observed for the model of beach nourishment embankment composed of sand and gravel installed on the mortar fixed bed.

In the experiments, since the motion of sand and gravel was different, they are found to perform different deposition functions in the beach formation processes. Functions of the gravel layer are found to prevent the loss of sand beneath the gravel layer. These functions were classified into seven mechanisms.

In the comprehensive view, sand materials move to onshore by long period wave and recover the beach profile while gravel materials are less mobile and tend to cover and protect the sand layer.

In the experiments, temporal variations are described for the beach nourishment embankment cross-section area, retreat of the shoreline, recovering beach profile by onshore sediment transportation. On the basis of experimental results, together with the economic aspects, it was shown that sand gravel mixed nourishment was considered a practical solution to enhance beach endurance against to the wave action.

Chapter 4 summarizes the conclusions in this study with special issues to be solved in the future study. One of the main results of this study is the use of sand gravel mixed beach nourishment to improve the beach endurance against the wave action. Practical problems expected in the field are also described in this chapter in terms of utilizing the result of this study for resilient beach nourishment.

On the basis of this study, it is expected that the performance of nourishment will be enhanced by the use of graded sediments having a wide variation in sediment size. This is also consistent with the integrated sediment

control measures in the watershed, in which sediments in various sizes will be utilized. With all these subsequent efforts and applications, the author expects that the good coastal environment will be inherited for the future generations.

目次

1 序論	1
1.1. 既往研究と本研究の位置の位置づけ	1
1.1.1. 養浜材料に関する研究の必要性	1
1.1.2. 既往研究とそれらの問題点	2
1.1.3. 本研究の目的と構成	3
1.2. 養浜の現状と将来性	4
1.2.1. 我が国における侵食対策の経緯と礫養浜の導入	4
1.2.2. 海岸保全の新たなフェイズを支える養浜	12
2 海浜におけるトレンチ調査	15
2.1. トレンチ調査の方法	15
2.1.1. トレンチの掘削と試料採取	15
2.1.2. トレンチ露出面の解析方法	18
2.1.3. 堆積状態の分類	21
2.1.4. トレンチ調査地点の選定	22
2.2. 静岡・清水海岸トレンチ調査	24
2.2.1. 静岡・清水海岸の概要	24
2.2.2. 測線の選定	26
2.2.3. 沿岸漂砂末端の砂嘴先端の三保飛行場前 (No. 13)	26
2.2.4. 汀線変化が止まっている駒越南町地先 (No. 60)	33
2.2.5. 供給源となっている安倍川河口左岸の中島地先 (No. 75)	39
2.2.6. 静岡・清水海岸のトレンチ調査の考察	45
2.2.7. 静岡・清水海岸のまとめ	49
2.3. 富士海岸におけるトレンチ調査	50
2.3.1. 富士海岸の概要	50
2.3.2. 測線の選定	51
2.3.3. 礫養浜投入箇所の手側に位置する No. 43	52
2.3.4. 檜新田地先 (No. 51) の調査結果	59
2.3.5. 供給源となっている富士川河口左岸の三四軒屋地先 (No. 79)	65
2.3.6. 富士海岸のトレンチ調査の考察	71
2.3.7. 富士海岸のまとめ	78
2.4. 浜松篠原海岸におけるトレンチ調査	80
2.4.1. 浜松篠原海岸の概要	80
2.4.2. 測線の選定	82

2. 4. 3. 礫養浜投入箇所の手側に位置する No. 161	82
2. 4. 4. 養浜開始後に離岸堤が設置された No. 163	89
2. 4. 5. 養浜開始後に離岸堤が設置された No. 165-1	97
2. 4. 6. 浜松篠原海岸のトレンチ調査の考察	103
2. 4. 7. 浜松篠原海岸のまとめ	114
2. 5. 海岸底質による耐波侵食性の違い	117
2. 5. 1. 各測線の汀線位置の変化	117
2. 5. 2. 汀線位置の変化量と外力の対応性	123
2. 5. 3. 砂を多く含む測線との対応付けによる耐波侵食性の評価	125
2. 6. 海岸トレンチ調査のまとめ	129
3 養浜による前浜地形の耐波侵食性向上に関する水理模型実験	130
3. 1. 実験の目的	130
3. 2. 実験方法	130
3. 3. 養浜盛土の侵食と固定床上の堆積の推移	133
3. 4. 養浜盛土の耐波侵食性	138
3. 5. 前浜地形の耐波侵食性	139
3. 5. 1. 汀線位置の変化	139
3. 5. 2. 前浜地形とバー・ステップの断面積の変化	141
3. 5. 3. 砂と礫のそれぞれの役割	142
3. 6. 盛土構造が礫と砂の互層である影響	145
3. 7. 盛土材料と盛土構造の前浜地形への耐波侵食性	146
3. 8. 礫が砂の流出を防ぎ前浜全体としての耐波侵食性が向上する仕組み	146
3. 9. 現地トレンチ調査の再解釈	147
3. 10. 実験のまとめ	151
4 結論	152
4. 1. 主要な結論	152
4. 2. 今後の課題	153
謝辞	155

1. 序論

1.1. 既往研究と本研究の位置づけ

1.1.1. 養浜材料に関する研究の必要性

我が国では、漂砂系への土砂供給の減少や、沿岸に設置された構造物による沿岸漂砂の阻害が土砂収支のバランスの崩壊をもたらし、砂浜の侵食が深刻な状況となり、自然の力による回復が期待できない海岸が続出している。到達する土砂の絶対量が不足している場合には、漂砂制御施設を設置しただけでは海浜は回復しない。

このような海岸では、漂砂制御施設のみの侵食対策には限界があり、施設と海浜を構成する底質材料を補給する養浜との組合せによる対策が行われる必要がある。養浜の計画にあたっては、養浜材料の諸元や調達先の確保、歩留まり良さ、投入方法、養浜の効果予測、状況監視と効果評価の総合的な検討が必要となる。

理想としては侵食前と同じ粒度で養浜を侵食前の断面形状に戻るよう養浜し維持すればよいが、侵食環境を改善するため初期から膨大な投入量が必要となり財政的にも資源的にも不可能である。合理的な一つの解である砂礫混合養浜の手法を確立するために、砂と礫の堆積特性を解明する必要がある。

底質材料の主な諸元である底質粒径は、海岸地形を決定する基本的な物理特性値である。そこで、本研究では養浜材料や海浜の底質材料の粒径（一個の大きさ）と粒度（粒度分布を総称する場合）を中心に議論を進める。

現在の侵食対策の養浜事業では、早期に養浜の効果を得たい場合や購入材や長距離運搬を伴う場合、事業期間や予算規模に制約がある場合、投入時の形状（海浜断面積となる）をなるべく維持したい場合には、養浜材料に動き難くなるように現地の粒度よりも大きな材料が用いられる。

陸側で粒度を大きくすることにより、海浜断面積が持続されやすくなる。これは、波のうちあげ高は碎波点からの海浜断面積に依存することが知られているので、越波防止（波のうちあげ高の低減）の点からも意味がある。一方で、海浜の前浜勾配は粒径に依存しており、粒径が大きいと前浜勾配が急になる。したがって、侵食以前の砂浜よりも狭い浜幅でも陸上部で断面積を確保できることから、早期に越波防止の防災性能を確保できる利点が礫養浜にある。

しかし、礫ばかりの海浜へ極度に変質させることは海岸の断面構造を不安定にする可能性が高い。つまり、空隙が大きいために緩傾斜ブロック堤の被災（野口ら、2000）と同様な現象により、遡上波が浸透流となり砂を排出し内部で侵食が進む。この内部侵食が礫盛土の下で進行し堤防基礎へ達して、消波ブロックを投入した場合と同様に危険な状況を認知し難くなるという弊害を生じかねない。加えて、礫養浜は下手海岸への漂砂量の減少を招き、漂砂系の保全として見た時に養浜の目的に適うのかという視点も必要である。

また、海浜を保全するということは、越波防止のみが満たされれば良いのではなく、飛沫対策や親水性、景観や生態系の保護等の多様な価値の保全も

含まれる。飛沫の対策は、砕波時や波が構造物への衝突時に生じるが、飛距離に対応したバウファを設けることや海浜の勾配を緩くして飛沫の発生を抑えることとなる。親水性や景観、生態系については、侵食前の海浜がお手本となる。これらには、平面的な広さが必要であり、水中に形成されるバー地形や底質の変化も重要となる。海浜に砂成分が存在することで、多様な環境を有する海岸を形成することができる。

したがって、礫のみの養浜を続けることで、急勾配にそそり立つ前浜が形成されることになり、総合的に良い海岸を形成できない。さらに、元からある砂成分は次第に損失されてしまうため、砂成分も補う必要があり砂礫混合養浜とする必要がある。

また、近年では総合的な土砂管理として、河川との土砂需給関係の調査が進められるようになってきた。このような、河口近くの海岸や、養浜が実施された海岸などでは、粒径集団による総合的な土砂管理と連動する上でも、混合粒径底質の挙動（分級、移動、損失）が重要となる。流砂系や漂砂系において、土砂の流れを阻害するものがなければ、時空間的な分級作用により地先毎に粒度特性が異なる海岸が形成される。しかし、河口から沿岸に離れた海岸へ河川で採取した材料をサンドバイパスする場合には、元の海岸環境よりも礫が多いものを投入することになる。これを認識した上で、養浜を軸とした長期的な計画を立てる必要がある。

我が国の安倍川や大井川、那賀川、神通川、黒部川、姫川等のようにテラスが突出した形を形成する降雨量が多く勾配が急な河川では、混合粒径海岸の地形変化を理解することが重要である。このことは、土砂供給が相対的に大きくなる地形・気候を共有するアジア諸国にとっても共通の課題である。

1.1.2. 既往研究とそれらの問題点

砂礫混合養浜に関連する既往の研究は、表面や柱状のサンプルによる調査、砕波帯での混合底質の分級機構、海浜変形予測計算のための漂砂量測定、複数粒径の海浜変形予測計算に大別できる。

海岸の地形変化と粒径に関する代表的な古典的研究として、堀川・砂村の C 値（堀川ら、1975）が挙げられる。 C 値は、侵食状況の変化や対策の効果予測に基本的な検討パラメータとして用いられている。しかし、袈川ら（2012）は、砂礫混合海浜において詳細な連続観測を行い、広い粒度分布を有する海浜では評価に用いる粒径の選定に課題があることを示している。

山本ら（1999）は、熊野川から供給され七里御浜に堆積した礫堆積物の分布状況を物理探査により解明した。しかし、この手法は高額な割に解像度が粗く堆積時期の推定分解能が低いことから、その後はボーリングやジオスライサー（例えば、山本ら、2000）が用いられてきた。高川ら（2008）は、礫の堆積過程を中田島砂丘の断面からジオスライサーと地中レーダーから把握した。その海側の遡上帯で養浜材の礫成分の移動状況を把握するため、石川ら（2010）はツボ堀を実施した。このような現地調査では、堆積過程の一部分しか把握できない。

一方で、縮率が小さくできる大型造波水路を用いて、張ら（1995）は混合粒径の移動床で砕波による分級機構とバーおよびバームの粗粒化過程を示し、池野ら（2002）は粗砂と細砂の混合海浜の分級と粗粒化過程から粒径別の漂

砂量モデルを提案した。また、田中ら（1999）は海底部での水粒子の軌道振幅を再現する振動流装置を用いた実験により、2 粒径の混合砂を用いて浮遊砂量を測定した。これらは、砕波帯での分級機構や漂砂量測定を行ったものであり、堆積過程が再現されたものではなかった。

数値モデルにおいては、熊田ら（2003）の粒径分級を考慮した等深線変化モデルや黒岩ら（2005）の3次元海浜変形モデルにより複数の代表粒径を用いて砂礫混合海岸の地形変化予測計算手法が試みられている。しかし、これらの計算手法には砂礫の混合率や交換層の設定が必要となるが、これを現地データなどから得ることは現状で困難である。

養浜設計に対しては、近年、養浜した際の地形変化シミュレーションが行われるようになったが（例えば遠藤ほか,2015）、遡上域の地形変化計算は手法も確立されていないばかりか、遡上域の計算再現性を確認できる精度の情報すら希少であるのが実情である。

以上のように、砂と礫が混合している場合の堆積過程についての既往の研究は、解析学的アプローチに偏重しており、現地の実際の堆積過程と結びついておらず信頼性に欠ける。これは、現地の堆積に関する情報が少ないことも一因である。

海外における堆積構造の研究として、砂礫浜ではないが米国ノースカロライナ州ダックのバリア地形の海岸において陸軍工兵隊が実施した細砂と粗砂の混合状態の違いに着目した現地観測についての研究を Gallagher et al.(2016)が発表している。この研究では、トレンチを掘削して観測期間 7 日間（2014 年 3 月末～4 月初）に生じた一時化（ひとしけ：一つの気象擾乱により暴浪の状態が継続する期間とする）間の堆積構造の変化を波浪と潮位の変化により模式化した。ただし、Gallagher et al.(2016)の研究は、砂浜海岸の汀線付近に特化した粒度の変化や勾配の変化、堆積構造の形成を集中的に解明しており、遡上範囲全体の状況や砂と礫の海浜変形に対する相互の影響について検討したものではない。ところで、本研究の静岡・清水海岸での初めてのトレンチ調査が 2014 年 1 月であることから、ほぼ同時期にトレンチ調査が行われていたことになる。

本研究は、砂礫混合海浜の形成過程を解明するためのトレンチ調査を世界的に初めて実施し、遡上する砂礫の視点に立った直接観察による実証学的なアプローチを通じて、砂礫混合海浜の形成過程を明らかにするものである。さらに、現地調査で得られた観察結果を水理模型実験と対比させながら解釈することにより砂礫混合養浜の効率性を論じており、砂礫混合海浜の形成過程を多方向から検討した世界でも学術的・技術的に価値が高い研究と位置付けられる。

1.1.3. 本研究の目的と構成

養浜を軸とした長期的な計画と状況に応じた養浜手法を合理的に行うためには、遡上域における砂礫の移動実態に基づいた海浜状態の変化を予測するモデルが必要である。しかし、そのための基本情報となる砂礫混合海浜の形成過程が把握されていない。そこで、本研究では、砂礫混合海浜の形成過程の解明を通じて効率的な養浜手法を検討するために、現地海岸のトレンチ調査および水理模型実験を実施した。

砂礫混合海浜の形成過程の解明に必要とされるのは、砂礫が遡上する波により陸側へ移動する視点である。この視点がないと、指向性の存在や扁平飛び石の移動形態が見いだせない。この視点に合致するのがトレンチ調査で、この対極となる物理探査（リモートセンシング）に対して、「石の並びそのものが見られる」、「空隙がある礫のみの層の下も見られる」、「色の違いがわかる」、「サンプリングができる」、「礫の扁平性と指向性がわかる」、「誰でも解釈ができる」といった利点がある。

第 2 章では、養浜が実施されている漂砂系を対象として、堆積環境が異なると見られる地先海岸を選定し、実施したトレンチ調査について示した。砂礫混合海浜の形成過程を解明するためのトレンチ調査は、本研究で構築された手法で、トレンチの掘削露出面の観察により前述の利点が網羅され、砂礫の打ち上がりから遡上限界までを連続して把握することができるとともに侵食面も把握可能で、他の手法では得られない高密度な海浜の形成過程の情報が得られる。トレンチの掘削により海浜の堆積層を露出させて堆積構造や粒度、堆積の痕跡を生じさせた外力を分析した。各調査地点では長期間の断面測量が行われていることから、堆積層の境界と対比して大局的な変化から解析した。さらに、第 3 章では、第 2 章で見出された堆積構造の再現実験を行い礫が砂の流出を防ぐ仕組みを見出し、それらと現地で得られた堆積状況を対応づけた。

1.2. 養浜の将来性

1.2.1. 我が国における侵食対策の経緯と礫養浜の導入

古来より我が国では、文物交換の窓口、発展の源や海産の恵み、癒しの空間を供する海岸を国民の資産としての共通認識を持ってきた。我が国は、第二次世界大戦後に「東洋の奇蹟」とも呼ばれた高度経済成長期にエネルギーや生産拠点、輸送等のインフラを海岸域に整備して、国民の生活を豊かにするとともに、津々浦々に防災施設の整備を実現し被災の軽減を果たしてきた。その陰でじわじわと進行したのが海岸侵食である。

我が国の海岸は、港湾に付随する海岸を国土交通省港湾局が、漁港に付随する海岸を農林水産省水産庁が、干拓地等の農地に関連する海岸を農林水産省農村振興局が、その他の海岸を国土交通省水管理・国土保全局が、管轄しており、これらの官署を総称して海岸 4 省庁と呼んでいる。1960 年以降の海岸 4 省庁の海岸保全対策状況が、年度毎に「海岸統計」としてまとめられている。この統計から、施設の基数と護岸・堤防の延長距離、養浜投入容量の経年推移を示したのが図-1.2.1 である。施設の延長及び基数は、当該年度に存在する施設の数量で、増減の累積と同義である。養浜投入容積は、毎年投入された量である。投入された養浜材が波の作用により自然な地形に均されたり、漂砂源として投入され沿岸漂砂となり下手側へ移動したりするため、概ね同量を投入する必要がある対策の普及をみようとする場合には累積量より毎年の投入量の方が比較となると考えた。

我が国の海岸保全は、1953 年の 13 号台風や 1959 年の伊勢湾台風を契機として制度化されたことから、高潮高波対策（津波含む）が先行していた。海

岸堤防の延長は1990年初頭にピークを示し、高潮対策が概ね行き届いたことを示している。海岸護岸は、背後の地盤が護岸高以上となるもので、その地盤が波による崩壊を防ぐための侵食対策での設置が主となる。護岸の延長は近年まで微増しているの、喫緊を要する海岸侵食の範囲が未だ広がっていると推測される。突堤は、侵食対策として古くから実施されてきたが1980年代から減少している。これは、初期に設置された突堤は短突堤が多く侵食対策効果が限定的であるため、他の侵食対策施設へ転換が進んだと考えられる。

1960年代から1980年代にかけては、海岸にも河川下流部にも海浜を構成する砂礫が未だ豊富に存在して漂砂を維持していたため、消波ブロックで埋め尽くされた海岸はほとんど無く、ホットスポット的な海岸災害（越波や浜崖）に対して局所的に護岸が設置された。このような、護岸や堤防のみで対処することを線的防護と呼んでいる。その後沿岸漂砂の不均衡による侵食が進行して、前面の海浜が消失し基礎が洗われるようになり、堤防・護岸の表のり工が崩壊する被害が続出するようになった。海岸侵食が生じると施設の安定性のみならず、越波災害が頻発するようになる。そこで、前面の海浜保護と越波防止のために、離岸堤が設置されるようになった。この海岸防護の構えを、沖側の海域施設位置と岸側の堤防・護岸線の範囲（面）で波を鎮めようとすることから、面的防護と呼んでいる。しかし、面的防御が始められた初期には、離岸堤の設置によって隣接海岸に新たな侵食を引き起こす事例が多く生じるなど、沿岸漂砂のバランスについて考慮が十分でなく、侵食域を拡大する例が多く発生した。

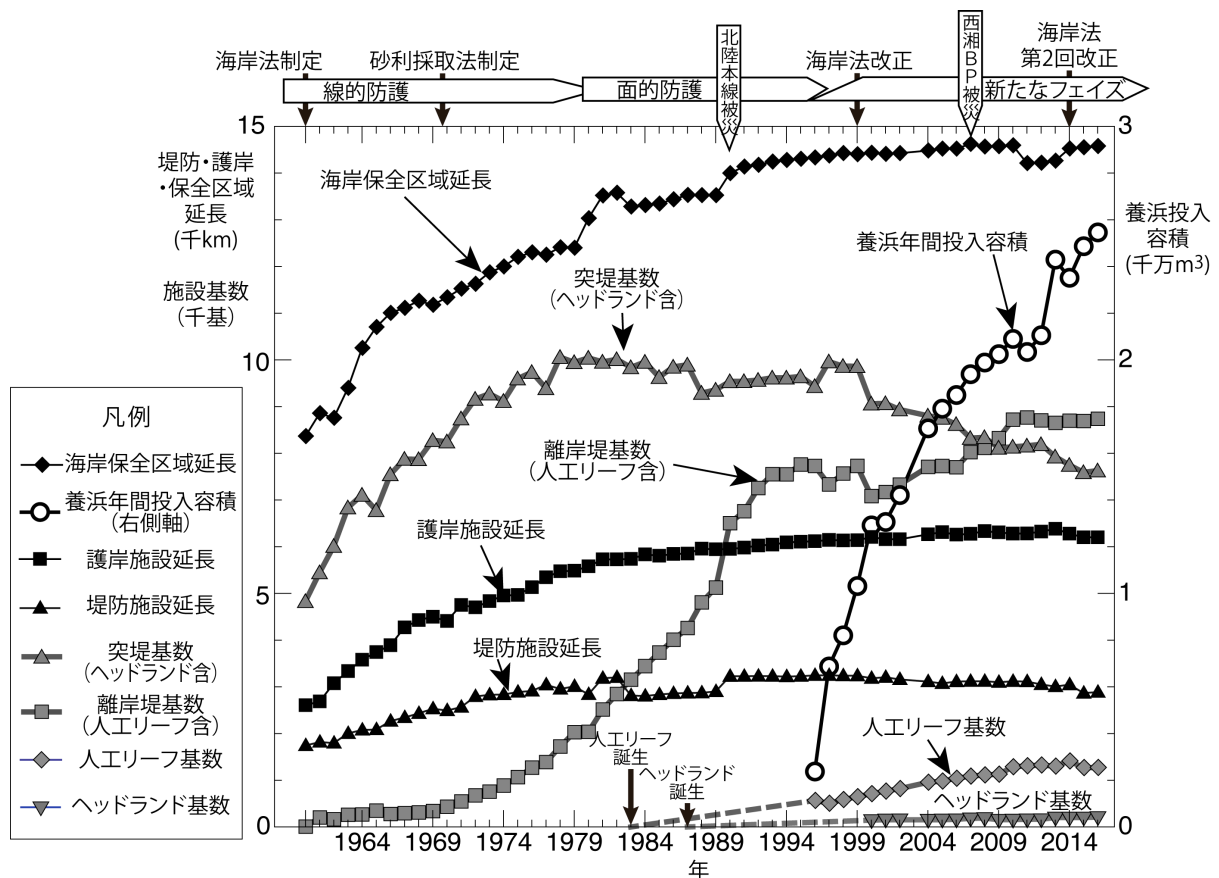


図-1.2.1 我が国の海岸保全施策の実施経緯

1980年代になると、新たな侵食対策が模索され始める。戦後の高度経済成長期の急激なインフラ投資を背景に、河川からの供給土砂の減少や、港等の沿岸漂砂を変化させる構造物による漂砂環境の変化、工場や宅地、道路等の用地として海浜の土地開発等が進むにしたがい、海岸侵食が著しく激化したためである。海岸侵食については、我が国における海岸工学コミュニティの結成と言える1957年の第1回海岸工学講演会で、既に議論されているものであった（例えば、石原(1954)）。また、離岸堤の漂砂制御効果については樫木(1957)により、離岸堤の近隣海岸への影響の評価手法が橋本(1974)により研究されていた。離岸堤が急速に増えた1980年から1990年にかけて、侵食対策が下手の侵食を引き起こす「いたちごっこ」が生じることが、侵食災害の解析から認識され始めた（宇多・野口, 1993）。また、港の防波堤等の大規模構造物が形成する静穏域が起動する循環流により永続的に砂が吸い込まれる仕組み（宇多・野口, 1990）等の大規模なメカニズムが海岸侵食を助長する現象が存在することが示された。沿岸漂砂の制御する構造物が設置することが試みられ、下手への影響を緩和する人工リーフや漂砂系を分割して管理するヘッドランドといった別の侵食対策手法が開発された。しかし、これらの手法は、漂砂系を保全する手法として活用されるまで拡張されていなかった。

1990年代末になり、漂砂系全体を通して地形変化を最適化する海岸保全の概念が初めて具体的に示され（佐藤, 1998）、皆生海岸でこれに対応した検討が実施された（佐藤ら, 1998）。一方、この計画思想に立ち検討を行った結果、系が破綻し海岸を構成する砂が既に枯渇していることの明確化につながった。侵食した海浜へ砂礫が到達しないことが海岸侵食の本質であり、施設設置のみでは不十分で海浜材料を供給することが必要となる。その対処ができない状況が続くと海浜材料は枯渇して、ついには施設で覆われた状態になってしまう。そこで、人工的に海浜材料を投入するのが養浜である。

1990年代後半からいくつかの海岸で養浜の実施が進められ始めた。ここでは、静岡県富士海岸の例を示す。富士海岸は、図-1.2.2に示すように富士川河口から東向きの漂砂は、概ね沼津市沼津港まで達する漂砂系を構成している。養浜が行われている吉原工区は、上手側に田子の浦港の建設により沿岸漂砂が遮断されたことが主因として侵食が激化した。現在は、港の直ぐ下手側へ港湾堆積土を養浜するとともに昭和放水路東側へ富士山大沢扇状地（砂防除石）の土砂を中心とした大規模養浜が実施されている。昭和放水路の下手へ投入される養浜は、主要な粒径を50～150mm（近年は10～150mm）に絞った礫養浜である。大きな粒径を用いることで養浜材の動きを緩慢にさせて、侵食が激しい区間の海浜回復を早めようとしている。

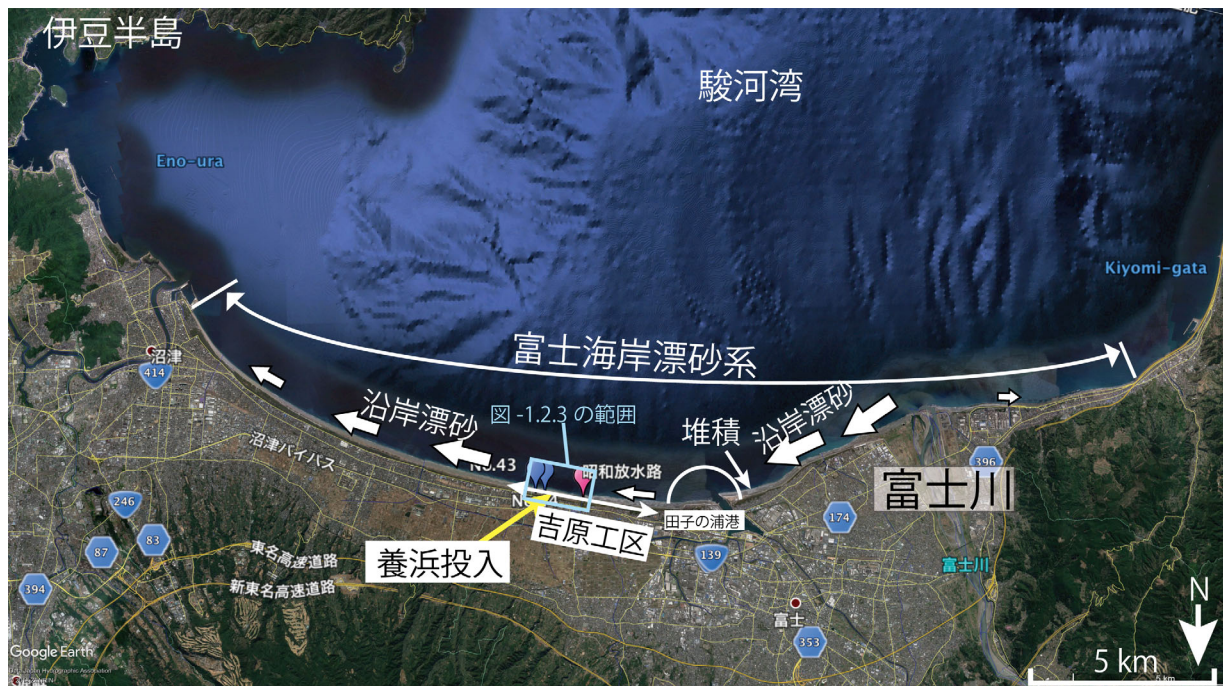


図-1.2.2 富士海岸漂砂系と吉原工区の位置

この継続的な礫養浜により、汀線位置が回復傾向となったこと図-1.2.3 に示す。最上段の 1961 年時点（国土地理院撮影）では沿岸漂砂上手（右手側）から滑らかに続いていることがわかる。この時点では海岸堤防が建設されていないことから、汀線までの距離感が掴めるように昭和放水路（桃色）と No.44（水色）の位置に印をつけてある。

1994 年には、沿岸漂砂上手（右手側）に消波堤が設置されているのが見える。昭和放水路東側（左手側）に侵食の応急措置として鉄棒で礫を包んだ対策工が設置されたがその状況が長方形の事物として見られるが、前述のように侵食への根本対策とならないどころか波力に耐えられなかった。この時点で、下手側（左手側）でも汀線の後退が見られ始めている。10 万 m^3 規模の大規模養浜は 1998 年から実施されている。三段目の 2009 年の写真では、昭和放水路から東へ向かう汀線の形状が堆積傾向を示す海へ凸型に変化しているが、未だ後退を抑えている段階と見える。しかし、2014 年の写真では、汀線が前進し回復しつつあることが明瞭に分かる。

写真-1.2.1 に 1986 年の昭和放水路東側の写真を示す。図-1.2.3 の 2 段目の 1994 年より 8 年前となる。既に、侵食が進行した状態である。写真-1.2.2 に 2000 年の養浜開始約 2 年後の状況を示す。写真-1.2.1 と写真-1.2.2 では、両写真の右手遠方の山並みと放水路目地、排気坑を基準として海岸位置を見比べることができるが、1986 年時点より養浜により大幅に回復したことが分かる。



図-1.2.3 富士海岸昭和放水路東側の変化



FUJICOLOR 86

写真-1.2.1 昭和放水路から漂砂下手側の状況（撮影推定 1986 年）



写真-1.2.2 養浜により回復された状況（2000 年 3 月 21 日撮影）

写真-1.2.2 に示したように昭和放水路から東側へ養浜材を投入していたが、放水路吐け口の埋塞が生じてしまうため、図-1.2.3 の最下段(2014.4.7)に示した養浜位置であり写真-1.2.3 の中央前方に見える盛土位置に投入されている。養浜が毎年行われることで下手側への土砂移動を抑制しているが、写真手前の消波工がむき出しとなっている状況から、養浜をやめた場合には直ちに 1986 年の状況に戻ることが想像できる。

この地点に投入されてきた大量の土砂が、図-1.2.2 に示した沼津に至るまで

の昭和放水路下手側の約 10km の海浜を維持している．現状で富士海岸吉原工区より東側（原工区）では，沖合い施設やヘッドランド等による漂砂系を分割して管理する手法は選択しておらず養浜を継続する一方で，急激な侵食に備えた埋設型の消波堤や港の堆積土砂の養浜材料が昭和放水路の沖に存在する海底谷に落ちずに円滑に下手側へ到達できるようにする土砂流出防止工（砂の回廊）が設置されようとしている．



写真-1.2.3 昭和放水路から漂砂下手側の状況（2011 年 2 月 15 日撮影）



図-1.2.4 神奈川県茅ヶ崎海岸中地区海岸の看板と状況（2009年9月11日撮影）

富士海岸では現地粒径よりも大きな養浜材料を投入しているが、投入材料の粒度分布に適正範囲を設定し流砂系から連携養浜しているのが、神奈川県茅ヶ崎海岸中地区である（神奈川県藤沢土木事務所なぎさ河川砂防部，2015）。この海岸では、図-1.2.4に示すように養浜の効果を利用者に認識してもらうための看板を設置している。この写真によると前方の突堤と手前の突堤の間地点において、2005年には護岸が常時波に洗われる状況であったが2009年には解消されている。

これらの海岸のように、養浜や河川からの供給により環境の侵食状態が改善される実績が、現れ始めている。養浜の本格化から約20年が経過し、この動きは面的防護の次に来るものとして、大きな流れとなりつつある。従来の防護中心とした施設整備から、海浜（砂浜、礫浜）の環境（自然環境と生活環境）を守る漂砂系の大循環を念頭に置いた海岸保全への転換である。これが、養浜を活用した海岸侵食対策の新たなフェイズへの進展である。

1.2.2. 海岸保全の新たなフェイズを支える養浜

砂浜の回復に必要となる養浜であるが、各現場で経済性の面から材料の質や投入方法が試行錯誤されている。養浜は、必要とされる漂砂量を見積り投入することが基本であるが、それに見合う養浜量の確保は容易でない。これに対して養浜量を減らす工夫として、施設との組合せで海象イベントに対抗するバッファゾーンを形成したり、構成粒度を調整することで侵食し難い堆積構造や移動を緩慢にしたり、事業間連携などによる材料の融通による養浜材料の確保等が行なわれている。

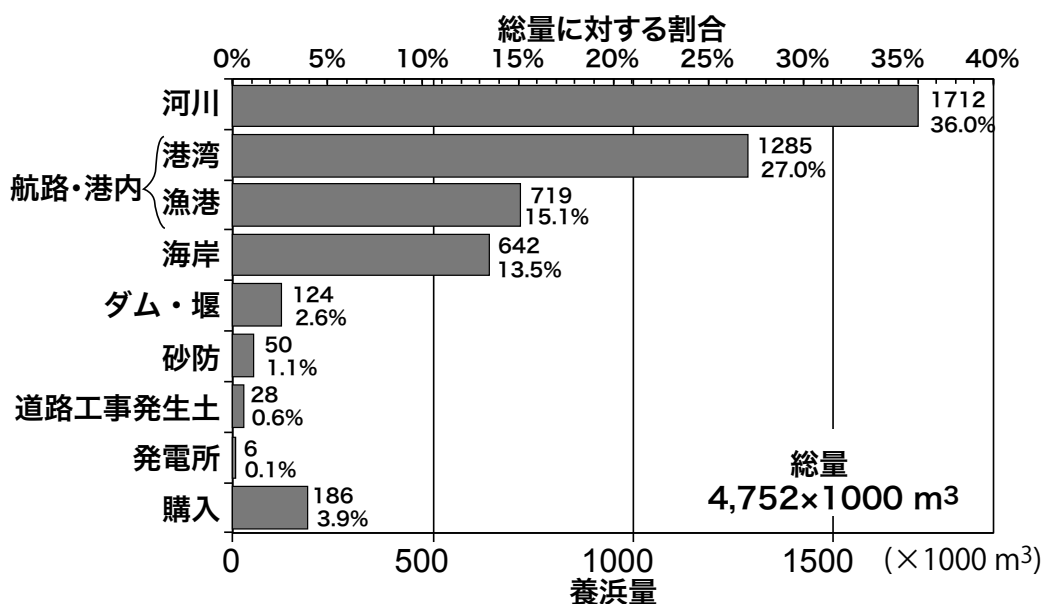


図-1.2.5 海岸における養浜材料の調達連携先（水管理・国土保全局所管海岸への搬入）

国土交通省水管理・国土保全局海岸室は、2013年～2015年の3年間の養浜実績について「事業連携等による養浜の取組の全国調査」を行なっている。その結果から、水管理・国土保全局所管の海岸における養浜材料の調達連携先を図-1.2.5に示す。河川関係との連携が最も多くなっている。我が国では、投入する材料の採取点が流砂系・漂砂系内にある場合には、上手側で採取し下手側へ投入する（飛び越えさせる）ことをサンドバイパス(Bypass)、漂砂系の下手側で採取して上手側へ投入する（戻す）ことをサンドリサイクル(Back-pass)と呼んでいる。

全国の養浜工の実績は、図-1.2.1に示したように1996年に237万m³であったものが2016年には2,351万m³と増えている。現在は種々の事情も組み合わせることで実施できている養浜事業であり、予算額や地元との調整、供給源の確保等の行政的な要素と養浜の量、材料の粒度、投入の方法、投入の頻度等の技術的な要素から最適化することにより、今後も養浜を継続できるかという点が課題である。

しかし、現実問題として、総合土砂管理はおろか、財政上や養浜材料調達上から養浜の実施すら厳しい。このような状況の中で、海岸管理者は事業間連携等の工夫を通じて養浜の実施に挑んでいる。そのため、合理的な養浜計

画や経済的な養浜手法（材料選択や投入位置等）が求められており，総合土砂管理も見据えた効率的な養浜手法の確立が必要である．

参考文献

- 池野正明・清水隆夫・田中正博・森信人（2002）：混合粒径砂を用いた大型岸沖海浜変形実験 ―粒径別漂砂の特性解明とモデル化―，電力中央研究所報告，U02014.
- 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.
- 石原藤次郎(1954)：海岸工学の現況，第 1 回海岸工学講演会講演集，pp.1-8.
- 褓川龍一・高川智博・佐藤慎司・長坂陽介・山中悠資(2012)：RFID を用いた砂礫混合海浜における礫の移動機構の解明，土木学会論文集 B2(海岸工学)，68 巻 2 号 p. I_491-I_495.
- 宇多高明・野口賢二(1990)：大潟海岸の侵食機構に関する一考察，海岸工学論文集，第 37 巻，pp.474-478.
- 宇多高明・野口賢二(1993)：糸魚川・青海海岸における海浜変形，土木技術資料 35-7, p. 31-36.
- 遠藤 和正, 榑原 秀作, 宇多 高明, 石川 仁憲, 古池 鋼(2015)：浜松篠原海岸の養浜後の汀線前進と沖合侵食の再現計算，土木学会論文集 B2(海岸工学)，71 巻 2 号 p. I_781-I_786.
- 神奈川県藤沢土木事務所なぎさ河川砂防部（2015）：養浜による海岸保全効果の検証，<http://www.pref.kanagawa.jp/uploaded/attachment/799520.pdf>，2016.8.5 取得
- 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.
- 黒岩正光・口石孝幸・加藤憲一・松原雄平・野田英明・中本良平(2005)：混合粒径砂の分級と汀線変化を考慮した 3 次元海浜変形予測モデル，海岸工学論文集，第 52 巻，pp.521-525.
- 佐藤慎司(1998)：海岸の地形環境モデル，第 34 回水工学に関する夏期研修会講義集，pp.B.2.1-B.2.20.
- 佐藤慎司・古屋隆男・見附敬三・谷口丞(1998)：日野川流域の土砂収支と海浜変形，海岸工学論文集,第 45 巻,pp.626-630.
- 榎木亨(1957)：沿岸漂砂に及ぼす海岸構造物の影響(第 1 報)，第 4 回海岸工学講演会講演集，pp.51-58.
- 高川智博・深瀬祐太郎・劉海江・佐藤慎司（2008）：地層構造および堆積物分析による天竜川河口周辺の海浜形成過程の考察，海岸工学論文集，第 55 巻，pp.681-685.
- 田中正博・磯部雅彦・渡辺晃・岡本孝司・植村勇仁(1999)：PIV 画像解析手法を用いた浮遊漂砂量計測，海岸工学論文集，第 46 巻，pp.1351-1355.
- 張達平・山本幸次・佐藤慎司・田中茂信(1995)：混合砂の分級過程に関する実験的研究，海岸工学論文集，第 42 巻，pp.481-485.
- 野口賢二，田中茂信，鳥居謙一，佐藤慎司(2000)：大型模型実験による緩傾斜ブロック堤の被災機構に関する研究，海岸工学論文集，第 47 巻，pp.756-760.

- 橋本宏(1974)：離岸堤による隣接海岸への影響予測モデル，第 21 回海岸工学講演会論文集，pp.181-186.
- 堀川清司・砂村継夫・近藤浩右・岡田 滋（1975）：波による二次元汀線変化に関する一考察，第 22 回海岸工学講演会論文集，pp.329-334.
- 山本幸次・佐藤慎司・野口賢二・宮野正実(1999)：熊野川を土砂供給源とする海岸の海浜変形と砂礫層厚，海岸工学論文集，第 46 巻，pp.666-670.
- 山本幸次，鳥居謙一，笠井雅広，佐藤慎司（2000）：柱状コア採取と音波探査に基づく鹿島灘沿岸の堆積物特性の把握，海岸工学論文集，第 47 巻，pp.651-655.
- Gallagher E, Wadman H, McNinch J, Reniers A, Koktas M. (2016): A Conceptual Model for Spatial Grain Size Variability on the Surface of and within Beaches, Journal of Marine Science and Engineering, 4(2):38., doi: 10.3390/jmse4020038

2. 海浜におけるトレンチ調査

2.1. トレンチ調査の方法

2.1.1. トレンチの掘削と試料採取

地形の内部構造を把握するために、既往の研究ではボーリング（山本ら，1999），ツボ掘り（石川ら，2010），ジオスライサー（山本ら，2000），地中レーダー探査（山本ら，1999），それらを組み合わせた調査手法（高川ら，2008）が用いられてきた．これらの手法では，全体像が見えないことや砂礫の堆積状況を直接観察することができない．本研究では，海浜にトレンチを掘削し観察するという極めて大胆かつ単純な方法を初めて実施した．トレンチの掘削から試料採取までの作業フローを図-2.1.1 に示す．このフローは，1 度目の静岡・清水海岸と 2 度目の富士海岸の経験から，3 度目の浜松篠原海岸での調査に当り作成したものである．このため，前者の 2 度の調査では，これに準拠していない部分がある．

トレンチの掘削線は，既往の海浜横断測定の測線と合わせるか，それと平行な近傍に設定するようにした．掘削線の海側に仮ベンチマークを設定し，海浜横断測定の基準点から距離と標高差を測る．一連の調査の試掘であった三保 No.13 は，この測定が不十分であったため，定期測定との比較や縮尺合わせの精度が低くなっている．

トレンチは写真-2.1.1 に示すように，バックホウにより深さ約 2m までとなるように掘削した．この写真は，富士海岸檜新田地先（No.51 付近）のものであるが，この地点では岸側に消波ブロックが埋設されていたため岸側から掘り進めた状態となっている．掘削面はなるべく鉛直の方が良いが，粒径が揃った礫の層の存在や，掘削後の時間経過による乾燥で崩れやすい状態となるため若干の角度がついている．礫海岸では崩れ易い層があるので掘削面の勾配を緩くする必要があり，砂浜海岸では掘削面の勾配をやや急にしても崩れにくい．

写真-2.1.2 に示すように，掘削面を観察し易くするために調整する．初めに，バックホウで掘削した状態では，掘削面が波を打つ等と荒れているため，スコップで平坦にして刷毛等で払い整える．次に，堆積構造を際立たせるために，礫が並んでいる方向にブラシをかける．また，掘削に際して礫層に混じった砂などを除去する．これらの作業中に層内に木質系の埋設物があれば，放射性炭素年代測定 (^{14}C) を行うために採取し，距離と標高を記録した．

トレンチ内に設置した起点とそこから 2 m 毎に測点を設定し基石等を配置する．仮ベンチマークから基石の標高差を測定する．スプレー塗料等で測点毎に距離線と標高線を掘削面に記した．

堆積層から粒度分析のための試料を採取した．採取を行うとそこから上の堆積層が崩壊するので試料が混ざらないように慎重に行うとともに採取位置も少しずつずらした．

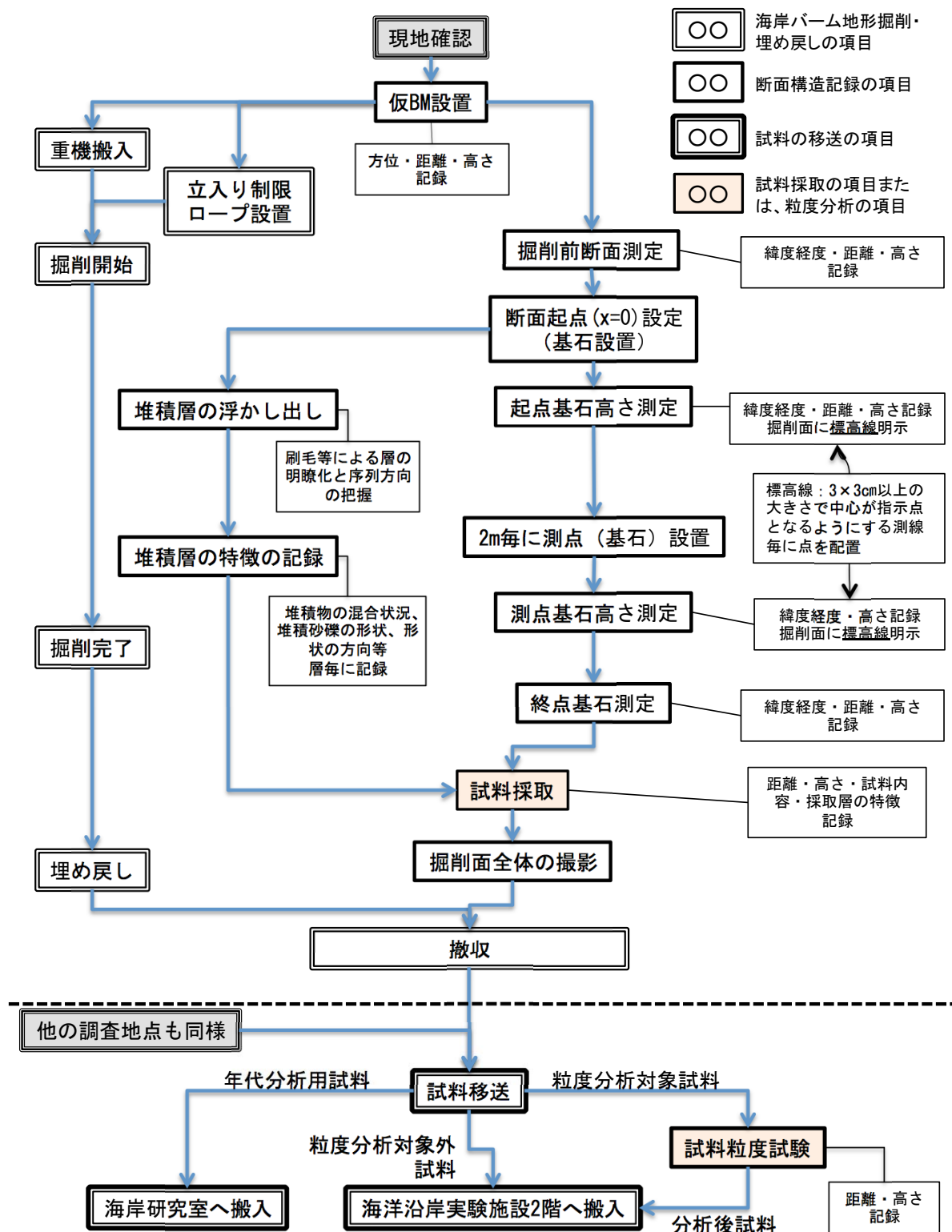


図-2.1.1 トレンチ掘削調査のフロー



写真-2.1.1 掘削の形状（2015年2月4日富士海岸 No.51 付近）



写真-2.1.2 掘削露出面の調整（2015年11月17日浜松篠原 No.161）

2.1.2. トレンチ露出面の解析方法

a 縞模様（現存する地表面痕跡）の推定方法

トレンチを掘削して露出面で観察できる縞模様は、その層が堆積した際の状況の違いから不連続面として現れるもので堆積時の地表面の痕跡である。これらが形成された時期を知ることができれば、その時期の波浪観測結果と比較することで、外力との関連づけが可能となる。

一方で、定期的実施されている海浜横断測量結果は、まさに測量時点の地表面の線である。実際には、その後に地表面より上に堆積が生じれば層の境界面として残り、侵食が生じればその時点より以前に形成されていた層が消去される。この消去過程を経年の海浜横断測量結果で再現すれば、現在観察できる縞模様の推定が可能であると考えた。ただし、縞模様が形成されるには、分級作用により粒径が異なっていたり、形成時の堆積物の成分や砂の色が異なっている必要がある。

図-2.1.2 に浜松篠原海岸の No.165-1 を例として具体的な縞模様の推定手順を示す。図中左上は、定期測量開始後の全ての測量結果を表示した。この図から分かるように、測量時期によって測定される岸沖方向の位置は異なる。交点を割り出して分割して比較する方法もあるが複雑になるので、新たに共通な等間隔測線を設定して、その位置の値で内挿して測量時期と高さのデータセットにする。内挿の間隔は x 方向に 10cm ピッチとして、全ての測量時期の点データを構築した（図中右上が概念図）。

次に上下比較により残存する点を割り出す。ただし、測量データが多いことから先に示した古い方から進める考え方通りに行うと比較の回数が多く、長時間の計算時間を要する。そこで、近年に侵食を経験している海岸が多いことから、最新の測量結果から遡ることで、本来は終わりの方で一挙に消える分の比較を先に消すことで結果とし消去される無駄な比較ルーチンを省略できる。

このように、時期に関する繰り返しである測量時期について、ある x の位置で、その測量時期の値（図中右上では 40 番の 2015 年 11 月の最新測量値）を見たときに、それより上方にある古い点は全て侵食を受けて存在しないことから、データセットから削除する。最新測量値についてだけ、比較を行った結果が図中右中の図である。侵食が進行している海岸であるために最新年でほとんどが消去されてしまう。

この作業を最も古い測量まで行くと図中右下が得られる。これは現存する地表面痕跡を推定したものであるが、掘削によって得られる堆積層の露出面の縞模様に近似していると考えられる。

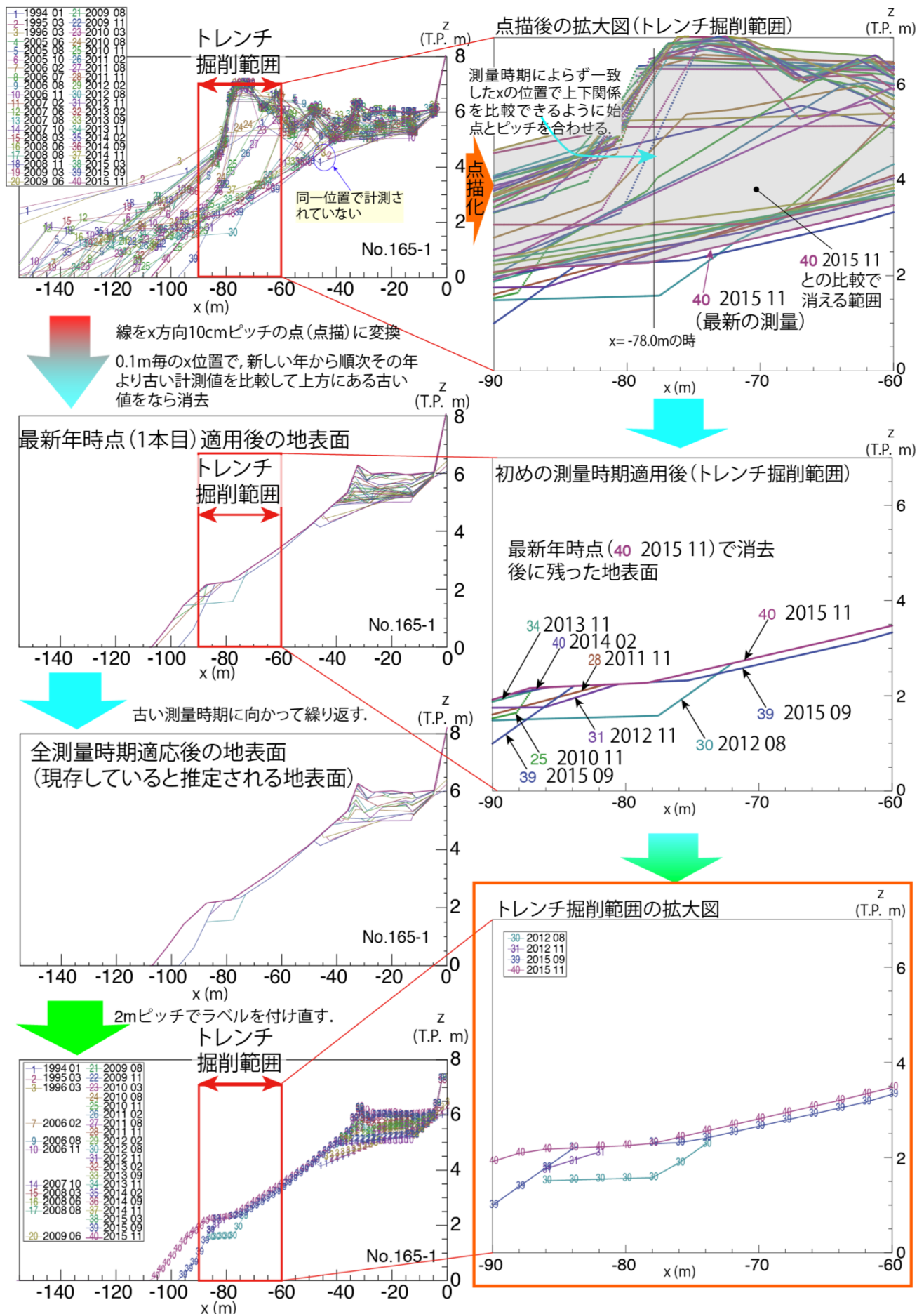


図-2.1.2 掘削面に現れる地表面の推定 (左：陸上部全体，右：掘削区間 No.165-1)

b 露出面写真の 3 次元モデル化

掘削面の記録は、掘削面をなるべく広くオーバーラップさせると同時に海浜状況も合わせて撮影した。撮影した写真データを 3 次元幾何モデル作成アプリケーションである Agisoft 社 PhotoScan により幾何モデル化し、水平方向から掘削面に垂直となるようにオルソ画像を抽出した。3 次元モデル化は、海浜表面やバームと地中の堆積層の状況を連続したオルソ画像により比較するだけでなく、沿岸方向の水平を確認するためにも使用した。

c オルソ画像への推定線の合成

これを先に作成したオルソ写真と縮尺を合わせて重ね合わせることで海浜状況の変化を予測可能である。ただし、露出面で見られる縞模様はより細かく測量のタイミングの間で来襲した波により侵食や堆積が生じるために、完全に一致しない。また、トレンチと測線の方角が異なっていたり、トレンチが屈曲してしまうことでも一致しない原因となる。

d 本研究の堆積層観察における用語の定義

縞模様は堆積物の質や粒度、色が異なるために生じ多くは外力の過程により一つの層を形成していると想定されるが、それらの層の境界を地学の堆積学に関する用語を用いて「層理面」と呼ぶことにした。また、一つの層内で堆積環境に変化がないものの色等で縞模様が形成され区別が必要な時には、単に縞模様とした。

堆積層が観察できる面は露頭と呼ばれるが、本研究では重機掘削によりトレンチを形成し観察するので「露出面」と呼ぶことにした。

堆積層に含まれている礫について長径の軸方向を礫の向きとして、それらが同じ方向を向く時、「指向性がある」とする。さらに礫がその層を構成する際の流体の外力状態と礫の向きが関連付けることができる礫の存在状況を「堆積構造」と呼ぶことにした。

2.1.3. 堆積状態の分類

堆積の状態の主要な7つを図-2.1.3に示す。

これらは、本研究の議論において特に重要でかつ明瞭な状況のものを示した。実際には、それぞれの状況が混在している。

イ) のバーム部分は礫が乱雑に堆積した状態であり、砂が存在しても下方の礫の間隙に存在する。ロ) は礫のみで堆積層が形成されている場合で、大礫もしくは中礫の場合には指向性を有して堆積している(ロ-1)。細礫の場合(ロ-2)には扁平なものが多い場合には指向性を有するが、球形に近い場合には指向性を有していないように見える。また、砂が混合することは少なく、崩れやすい。ハ) は、礫が指向性を有して堆積しつつ、礫の間に砂が充填されている状態である。ニ) は砂のみで堆積層が構成されている場合である。ホ) は、砂の層と層の間に礫が指向性を有して点在している状態である。比較的陸側で見られる。ヘ) は礫と砂が指向性なく混合している状態である。

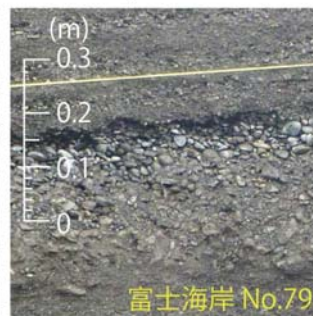
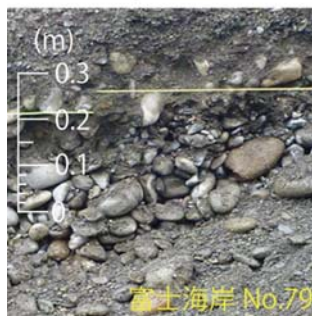
イ) 礫だけで構成され三角形状をしたバーム部分



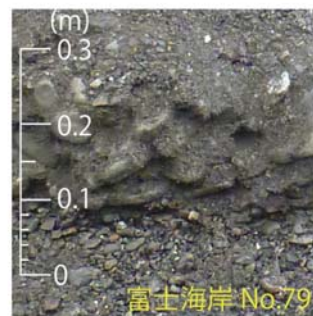
ロ) 礫だけで構成されている

ロ-1) 大礫

ロ-2) 細礫



ハ) 主に礫で間に砂が詰まっている



ニ) 砂だけで構成されている

ホ) 砂の層の間に飛び石

ヘ) 礫と砂が混合

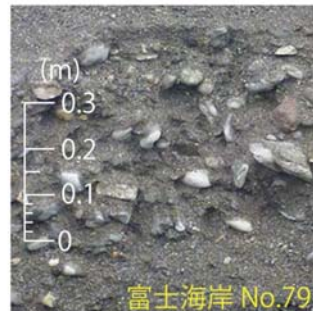
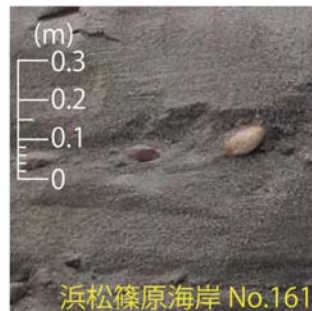
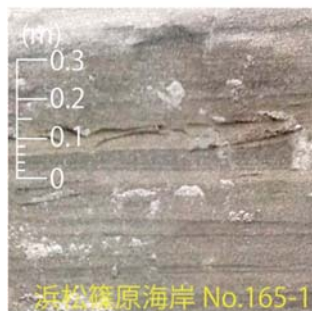


図-2.1.3 堆積状況の例

2.1.4. トレンチ調査地点の選定

トレンチ調査地点は、海岸を動的な安定により管理され、漂砂環境のバリエーションに富んだ静岡県の海岸から図-2.1.4 に示す 3 つの漂砂系を選び、各漂砂系で漂砂状況から 3 地先を選択した。漂砂系は、調査実施順に安倍川-静岡・清水海岸、富士川-富士海岸、天竜川-遠州灘沿岸である。図中の黄色線は養浜材の採取場所と投入地点である。漂砂系に対応する漂砂源と 3 地先の地先名と定期測量の測線番号、漂砂環境を表-2.1.1 にまとめた。

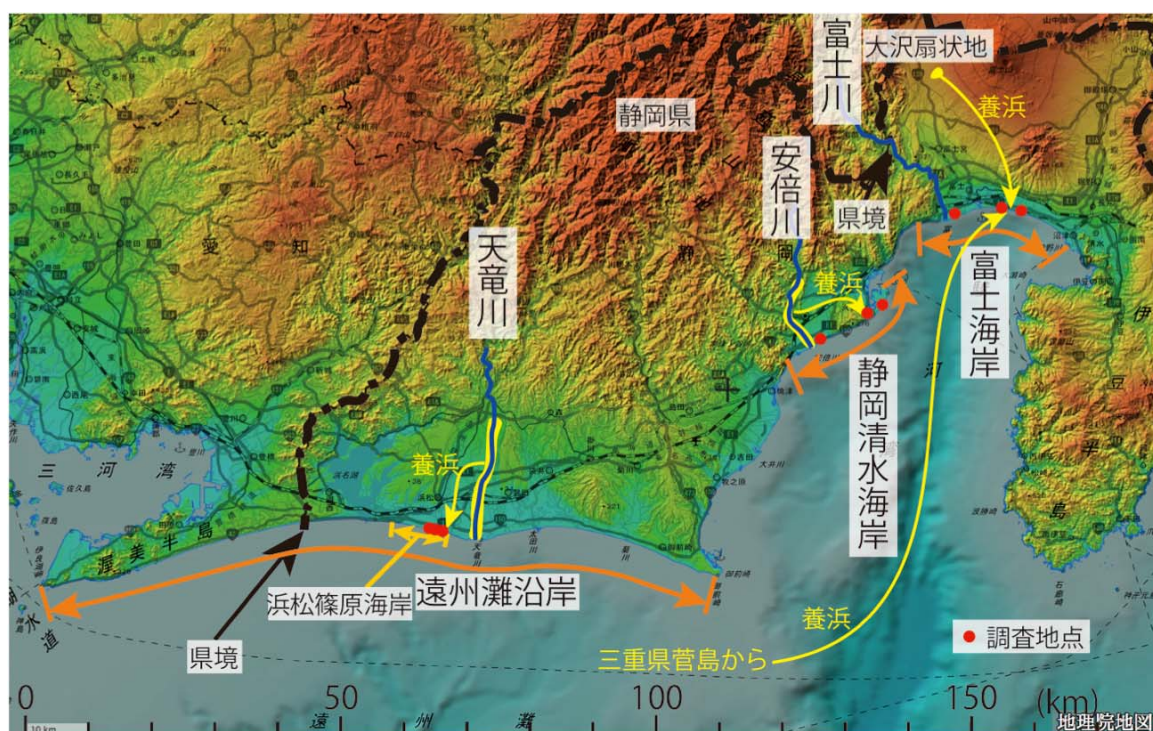


図-2.1.4 トレンチ調査地点（全地点）

表-2.1.1 調査地点の一覧と特徴

漂砂系	調査地先名と定期測線番号	漂砂環境	海岸底質の特徴	河口近傍
安倍川-静岡・清水海岸	中島 No.75	離岸堤間 河口デルタ内	砂と礫半々の海岸	安倍川：流域面積 567km ²
	駒越南町 No.60	養浜下手	礫中心の海岸	
	三保飛行場 No.13	砂嘴（漂砂最下手）	砂と礫半々の海岸	
富士川-富士海岸	三四軒屋 No.79	河口隣接	砂と礫半々の海岸	富士川：流域面積 3990km ²
	檜新田 No.51	消波堤間	礫中心の海岸	
	東柏原新田 No.43	上手側途絶 港湾，放水路	礫中心の海岸	
天竜川-遠州灘沿岸	浜松篠原 No.161	上手側に養浜地点	砂に養浜材の礫が混合	天竜川河口までに離岸堤群
	浜松篠原 No.163	離岸堤間	砂に養浜材の礫が混合	
	浜松篠原 No.165-1	上手離岸堤，供給が少なく下手の移動が自由	砂浜海岸	

参考文献

- 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.
- 高川智博・深瀬祐太郎・劉海江・佐藤慎司（2008）：地層構造および堆積物分析による天竜川河口周辺の海浜形成過程の考察，海岸工学論文集，第 55 巻，pp.681-685.
- 山本幸次，佐藤慎司，野口賢二，宮野正実（1999）：熊野川を土砂供給源とする海岸の海浜変形と砂礫層厚，海岸工学論文集，第 46 巻，pp.666-670.
- 山本幸次，鳥居謙一，笠井雅広，佐藤慎司（2000）：柱状コア採取と音波探査に基づく鹿島灘沿岸の堆積物特性の把握，海岸工学論文集，第 47 巻，pp.651-655.

2.2. 静岡・清水海岸トレンチ調査

2.2.1. 静岡・清水海岸の概要

静岡・清水海岸は、図-2.2.1 に示す安倍川の河口から東側の三保半島までの東向きの沿岸漂砂が卓越する一連の漂砂系である。沖合には久能観測所があり、2004 年～2009 年のエネルギー平均波は 1.09m であった。

漂砂源である安倍川は、三大崩れの一つとされる大谷崩れに端を発し、水系にダムを有さない河川である。1969 年以降は砂利採取規制により河床高が上昇した。静岡海岸では、この施策の効果の発現として図-2.2.2 に示す経年の汀線変化において堆積波として東へ伝播しており（宇多ら、1997）、一時深刻化した海岸侵食は回復傾向となっている。しかし、滝ヶ原川より東側の清水海岸では、回復の速度が鈍化している。

そこで、静岡県は回復速度を早めるために、清水海岸へ図-2.2.3 に示すように安倍川からの養浜が実施している。石川ほか(2016)によると粒度分布は示されていないものの「養浜材に用いられた安倍川下流域の河床堆積土砂は、礫が 80%を占め粒径が粗い」材料が投入されている。



図-2.2.1 静岡・清水海岸漂砂系と調査位置

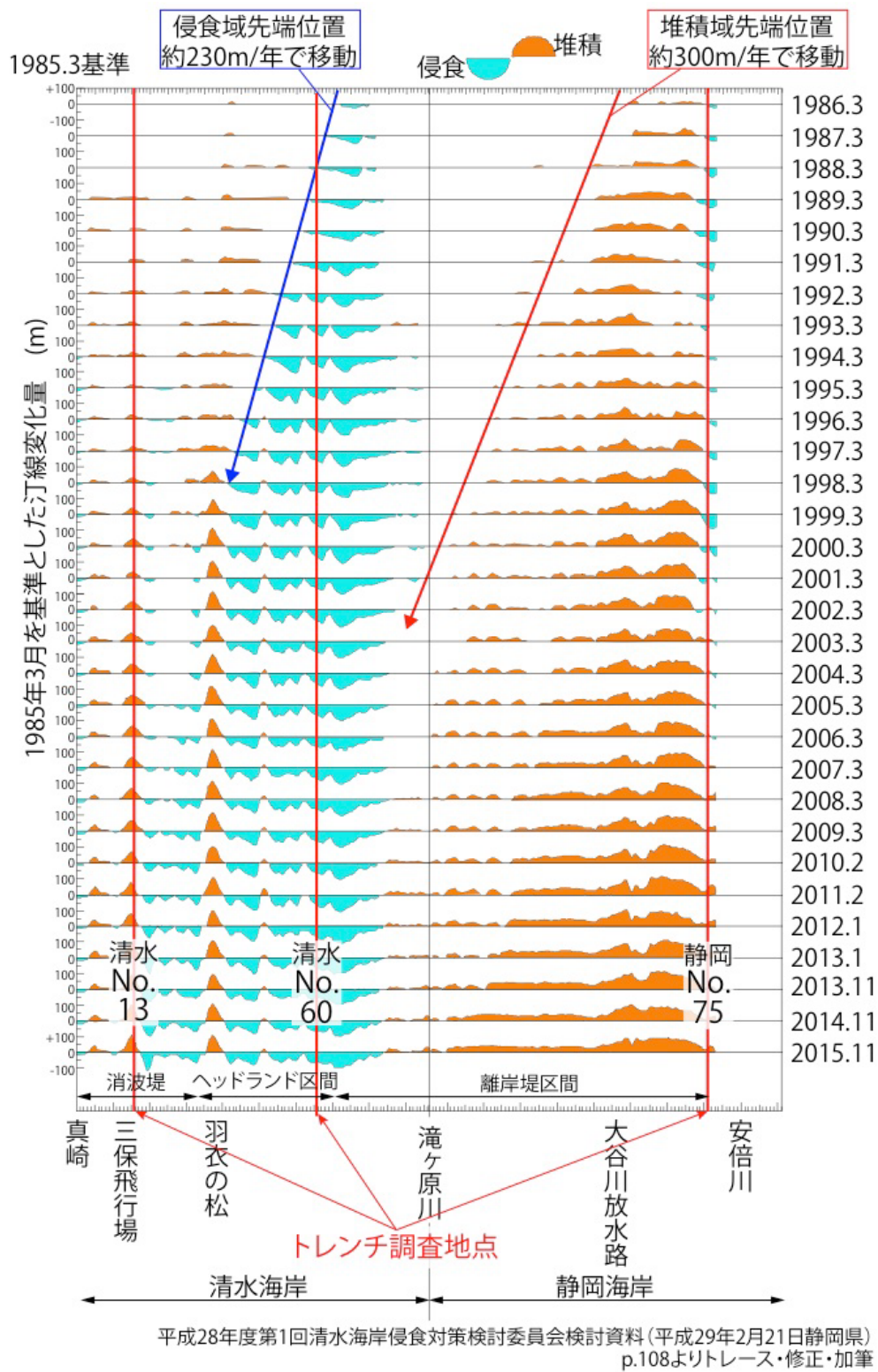


図-2.2.2 静岡・清水海岸の侵食・堆積の推移

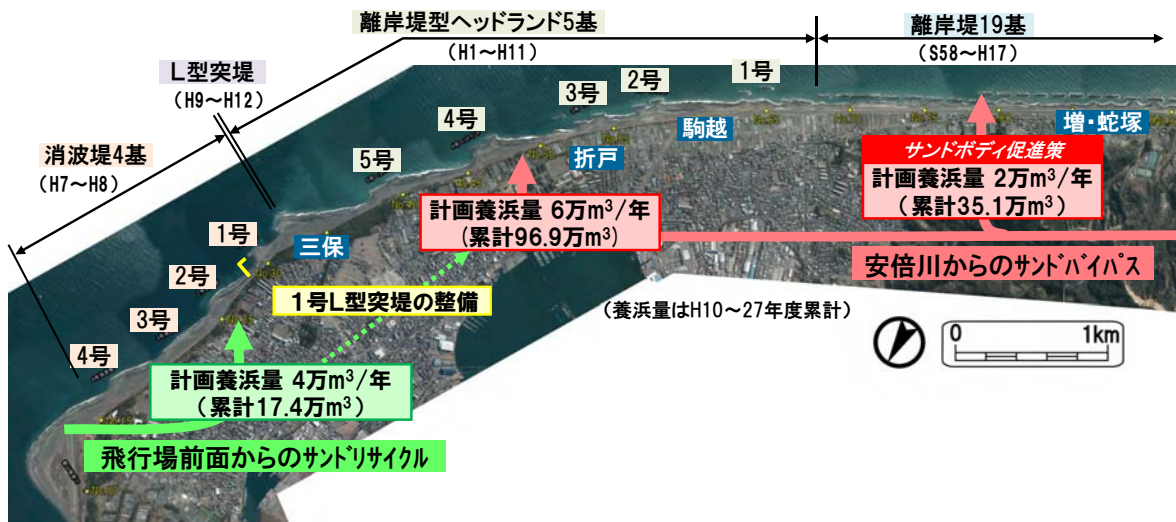


図-2.2.3 清水海岸の養浜計画（第3回安倍川総合土砂管理計画フォローアップ作業部会資料（2016）より）

2.2.2. 測線の選定

トレンチ掘削調査は、漂砂末端部となる清水海岸三保飛行場前（以下、三保飛行場前）、養浜の下手側となる清水海岸駒越南町地先（以下、駒越南町地先）、漂砂源である安倍川河口近傍の静岡海岸中島地先（以下、中島地先）の3地点で実施した。

これらの選定した3地点は、図-2.2.2 から分かるように静岡・清水海岸の漂砂系において特徴的な侵食・堆積状況の経緯を有する海岸となっている。三保飛行場前（清水 No.13）は、漂砂系端部であり堆積傾向である。駒越南町地先（清水 No.60）は、堆積波未到達の回復が鈍化している区間で長期間にわたり侵食状態であり、沿岸漂砂の上手側で養浜が実施されている。中島地先（静岡 No.75）は、漂砂源直近でかつ堆積波の範囲内であり堆積環境となっている。

清水海岸では、図-2.2.2 に示したように堆積域の東側への拡大が鈍っている状況に配慮して、安倍川河道の土砂を漂砂系の途中の静岡海岸の離岸堤区間をバイパスして駒越南町へ直接養浜を投入している。清水海岸における養浜計画を図-2.2.3 に示す。調査地点を土砂供給の観点から見ると、サンドリサイクルの三保飛行場前、サントバイパスの駒越南町地先、河川からの自然供給の中島地先となっている。

掘削調査は、2014年1月28日（三保飛行場前）、2月19日（駒越南町地先）、2月20日（中島地先）に実施した。以下の掘削調査結果では、掘削を行なった順に示す。

2.2.3. 沿岸漂砂末端の砂嘴根本の三保飛行場前（No.13）

a トレンチ掘削の位置と海浜状況（三保飛行場前）

三保飛行場前の調査位置を図-2.2.4 に示す。この掘削地点付近は、砂嘴地形の根元に相当し、ここより下手側の海岸線形状は急激に折戸湾方向へ屈曲する。各調査地点の断面は、図-2.2.5 に示すように汀線から60m程度で水深10mまで落ち込むように海底勾配が1/2.5程度と急になっている。他の測線で

は沖側が 1/60 程度であり，他地点と比べて波浪の減衰が小さく遡上波は高くなると推定される。

また，羽衣の松西側へのサンドリサイクル材の取得区域であり，掘削地点を含む海浜のバーム部分を剥いで材料とし，No.24～No.28 に投入している（静岡県，2013）。

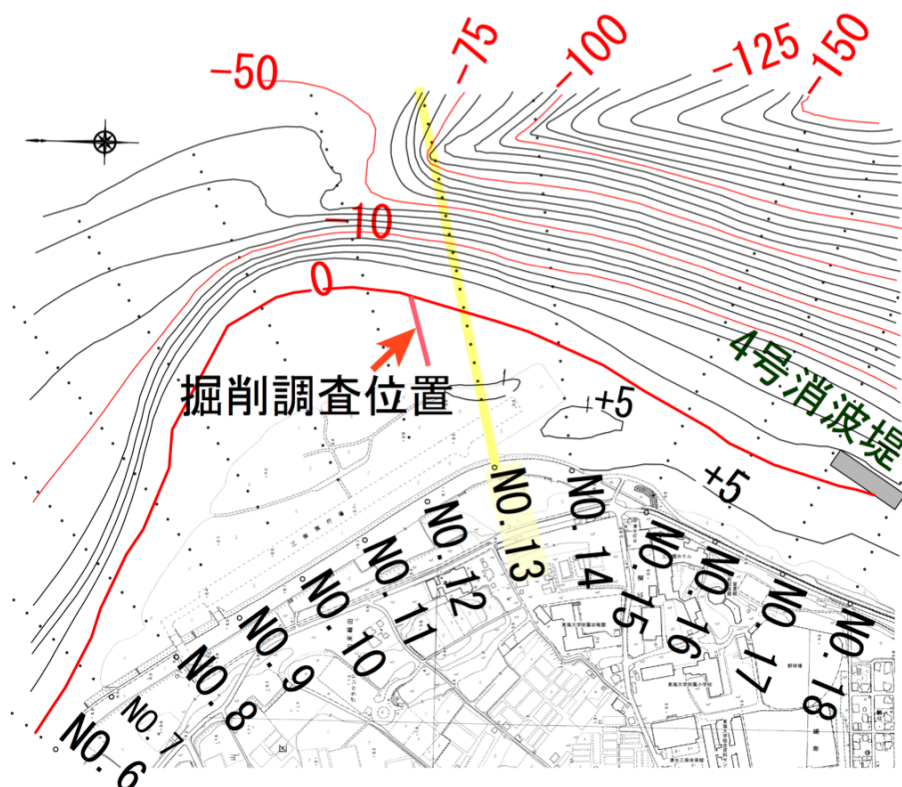


図-2.2.4 三保飛行場前（No.13）のトレンチ掘削の位置

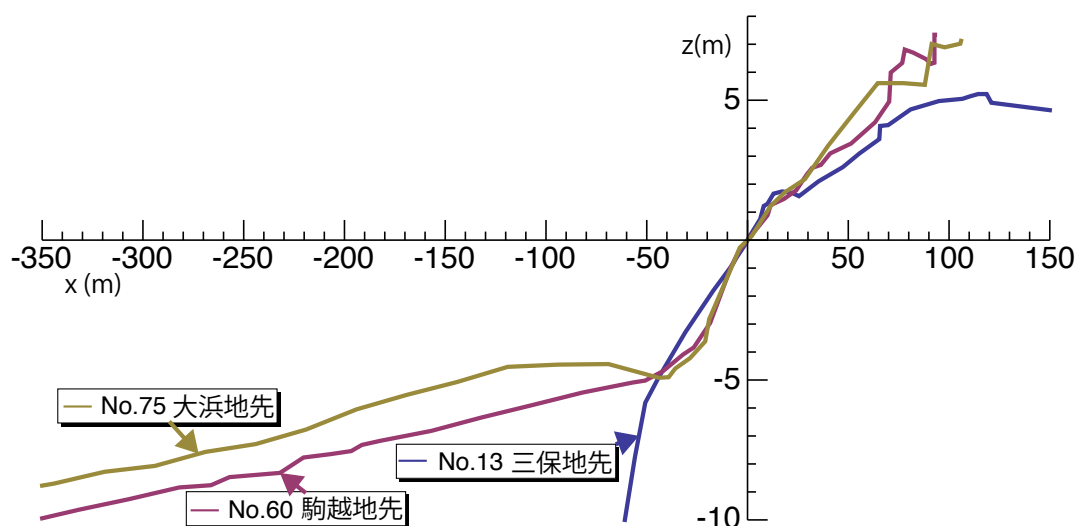


図-2.2.5 3 測線の海岸断面形状の比較（2013 年 11 月）

写真-2.2.1 は、掘削面と海浜の状況を砂嘴の先端方向に向かい撮影したものである。写真中程の土砂の山は、掘削土である。写真右端がバームでその背後からなだらかな砂浜が広がり左手奥の飛行場滑走路の砂除けの盛土が設けられている。この盛土に漂着ごみが打ち上がっており、ここまで波が遡上していると推定される。また、表面の状況は礫のバーム、砂が主となる背後と単調であるが、トレンチ露出面は幾つもの堆積層から構成され堆積環境が多様に変化していることが分かる。

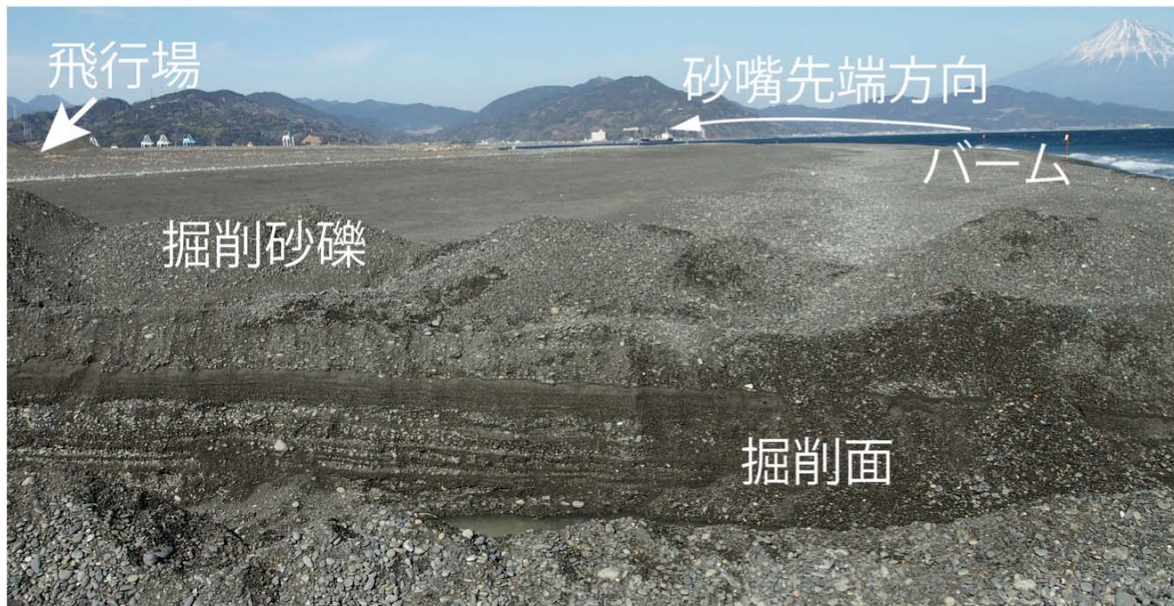


写真-2.2.1 トレンチから砂嘴の先端方向の海浜状況と掘削面（2014 年 1 月 28 日）

b 定期海岸断面測量から推定した露出面縞模様（三保飛行場前）

2.1.2.a 節で示した方法により、露出面の縞模様を推定したのが、図-2.2.6 である。2007 年以降に-210m～-230m に見られる平坦面は、サンドリサイクル材採取のために掘削したことが現れている。

残存線している線番号 42 は 2012 年 1 月の測量のものであるが、これが汀線側の地形を大きく侵食し、測量履歴の中で最も地形が後退した時期となっている。この侵食は、前年の 2011 年 9 月に来襲した台風 15 号によるものと考えられる。一方で次の時期で残存しているのは線番号 44 の 2013 年 1 月となるが線番号 42 と線番号 44 の間隔は広い。これら 2 本の線の期間に線番号 43 に相当する 2012 年 8 月測量の履歴は残存していないことから、2012 年 8 月までに 2013 年 1 月の残存線以上に堆積していたが、この間に生じた波浪により侵食を受けたことがわかる。

c 露出面の解析（三保飛行場前）

2.1.2.b 節で示した方法により、トレンチの堆積層の露出面を撮影した写真から合成されたオルソ写真を図-2.2.7a および図-2.2.7b に示す。岸沖方向に長いので 3 つに切断して示してある。図-2.2.7a の複数の線は、図-2.2.6 の現存する海浜面の線を縮尺を推定して重ね合わせたものである。図-2.2.7b は線を描かないもので層理面と見比べやすいようにした。

堆積層の構成は、玉砂利、小砂利、砂やそれらの混合等のバリエーションに富んだ互層が形成されている。砂利の層は汀線に近い方では小砂利が小さいため薄い、背後の領域では厚く明瞭となっている。しかし、全体で見ると砂のみの層は少ない。

前節で述べた線番号 42 と 44 の間は、多数の明瞭な層が存在している。

陸側（図最下段）の下層では砂の中に礫が混じった状況が見られる。図-2.2.7b の最下段で下層に相当する-40m から岸側の下部から岸側へ向かい砂が主体で大きな礫が混ざる層が陸側へ向かい厚くなっている。これらの点状する礫は乱雑に点状しているように見えるが、礫の長径方向を見ると同じ方向を向いておりこのことから層を区別可能である。

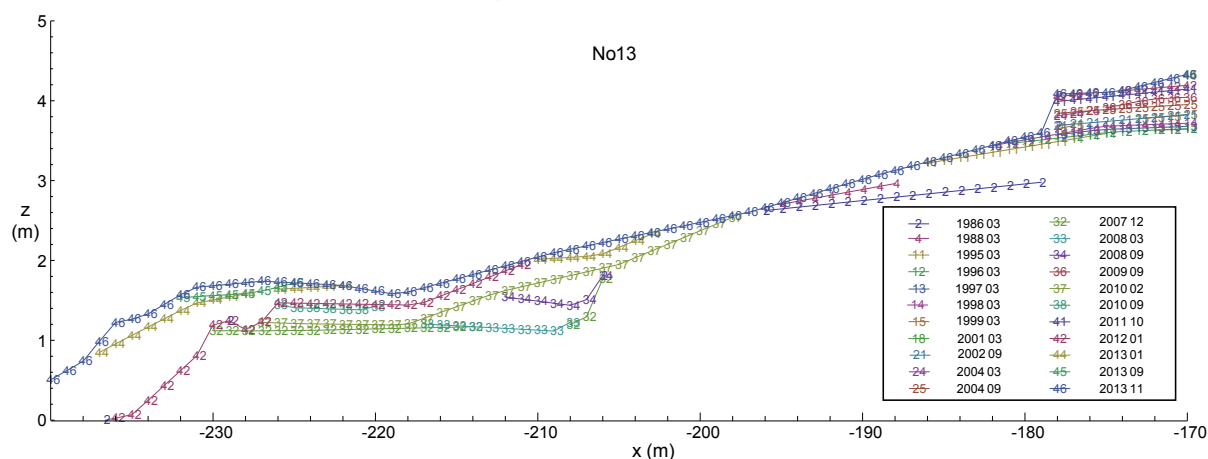


図-2.2.6 定期海岸断面測量から推定した露出面縞模様 (No.13)

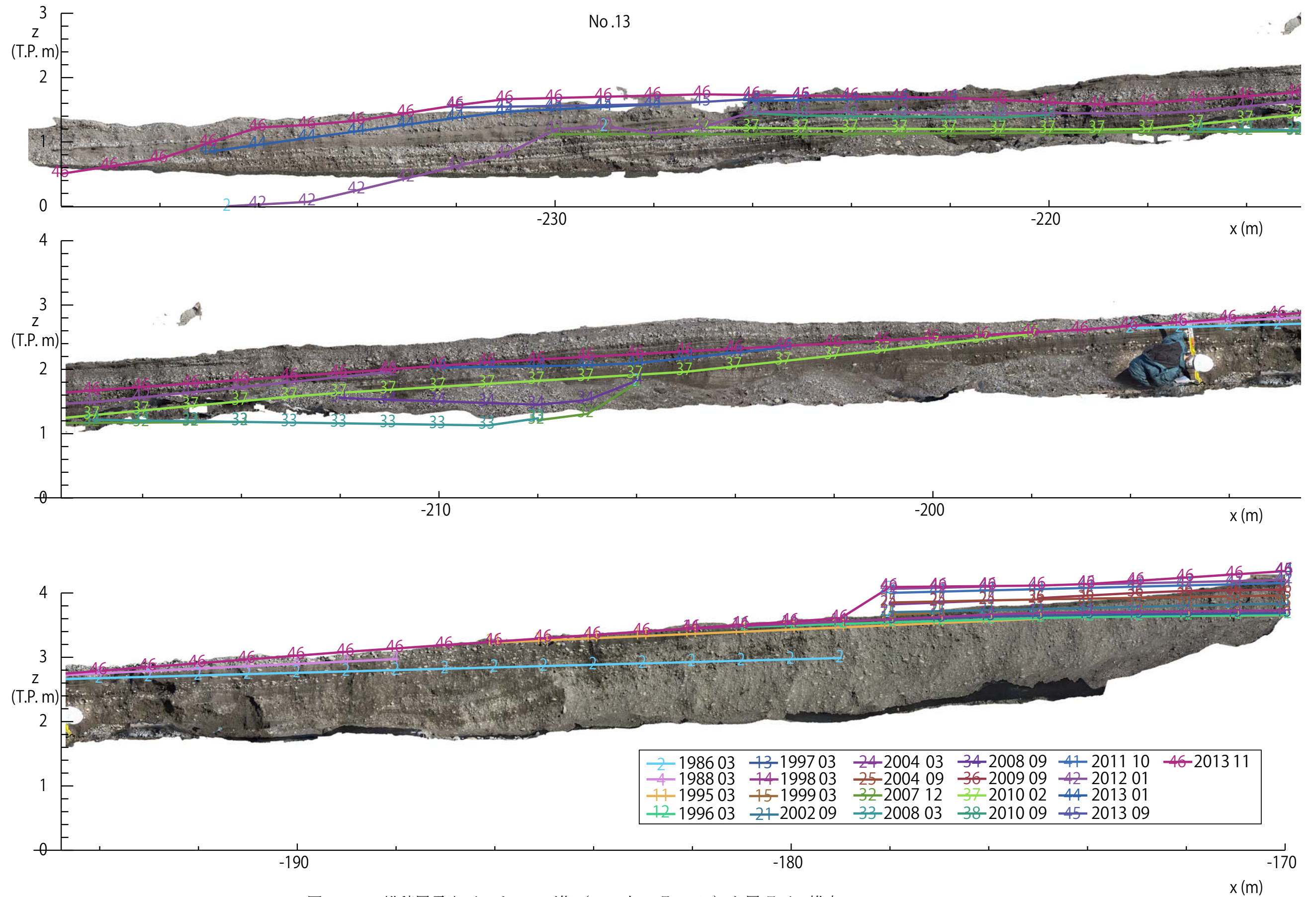


図-2.2.7a 堆積層露出面のオルソ画像（2014年1月28日）と層理面の推定(No.13)



2.2.4. 汀線変化が止まっている駒越南町地先 (No.60) の調査結果

a トレンチ掘削の位置と海浜状況 (駒越南町地先)

図-2.2.8 に駒越南町地先の調査位置と掘削状況を示す。調査地点は、養浜の下手側の1号ヘッドランドを越えた位置である。駒越南町地先は、図-2.2.2.で示したように侵食状態が続いており、この付近では汀線の後退量は抑えられているものの回復が未だ現れていない区間である。対策として安倍川からの養浜 (サンドバイパス) が行われている。海岸の断面形状は、図-2.2.5 で示したように漂砂源の安倍川河口左岸の中島地先 No.75 と似ているが、中島地先の $x=-50\text{m}$ から -150m 付近に見られるバー形状が駒越南町地先では見られない。

写真-2.2.2 は、海浜の状況を沿岸漂砂下手側に向かい撮影したものである。右側の手前 2 基の消波ブロックは 2 号ヘッドランドである。全体に中礫が分布している。写真からわかるように、掘削はバームの背後の斜面の中程の位置から始めた。写真-2.2.3 は、沿岸漂砂上手側を撮影したものである。右前方海上に見える消波ブロックは、1 号ヘッドランドである。また、トレンチ調査のバックホウの先方の盛土が養浜である。海岸線形状として規則的に明瞭なカスプが形成されており、礫の割合が多いことがうかがえる。

写真-2.2.4 で海浜の状況とトレンチで露出した堆積層を比較する。海岸の全体の底質の状況を表層の中礫が印象付けているが、表層直下では中礫があまり見られず、その下の表面となるように中礫が分布する等、表面の観察のみからでは得られない変化に富んだ構造を有していることがわかる。

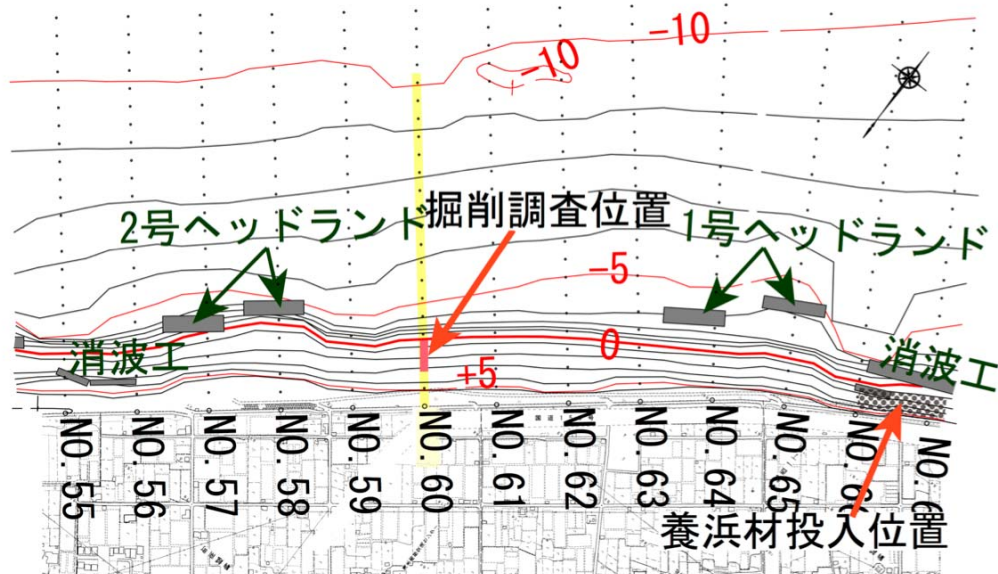


図-2.2.8 駒越南町地先 (No.60)のトレンチ掘削の位置



写真-2.2.2 漂砂下手側の状況（2014年2月19日）



写真-2.2.3 漂砂上手側の状況（2014年2月19日）



写真-2.2.4 海浜表面と堆積層の状態の比較（2014年2月19日）

b 定期海岸断面測量から得られる露出面縞模様の推定（駒越南町地先）

2.1.2.a 節で示した方法で推定した堆積層露出面の縞模様を図-2.2.9 に示す。測量データは 1985 年 3 月から存在しているが、最も古い残存する線は 2002 年 9 月測量（線番号 21）のものとなる。

2005 年 9 月断面（線番号 27）が、 $x = -46 \sim -53\text{m}$ では 2007 年 3 月測量（線番号 30）までに、 $x = -61 \sim -71\text{m}$ では 2006 年 9 月測量（線番号 29）までに侵食で切り込まれている。

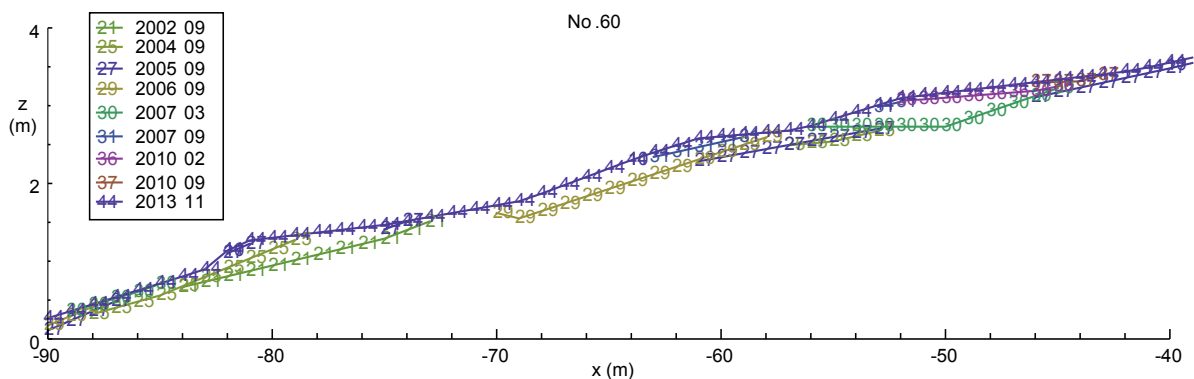


図-2.2.9 定期海岸断面測量から推定した露出面縞模様（No.60）

c 露出面の解析（駒越南町地先）

2.1.2.b 節で示した方法により，合成されたオルソ写真を図-2.2.10a（現存する地表面の推定線有り）および図-2.2.10b（現存する地表面の推定線無し）に示す．岸沖方向に長いため3つに切断して示してある．図-2.2.10a 中の線は，図-2.2.9 の断面測量残存線をオルソ写真の縮尺に合わせて重ね合わせたものである．

この測線の特徴として，定期測量開始以前（1985 年 3 月以前）と見られる堆積層も薄い層ばかりで構成されている点がある．図-2.2.2 によると，この測線は 1986 年 3 月時点では西から東へ拡大する侵食域が差し掛るか否かの段階であったことから，これより以前は侵食環境ではなかったと考えられる．つまり，侵食傾向となる以前の古い堆積層であり，多くの薄い層より構成されている．この状態は，この地先が元来活発な堆積が生じる環境でなかったことを示唆している．

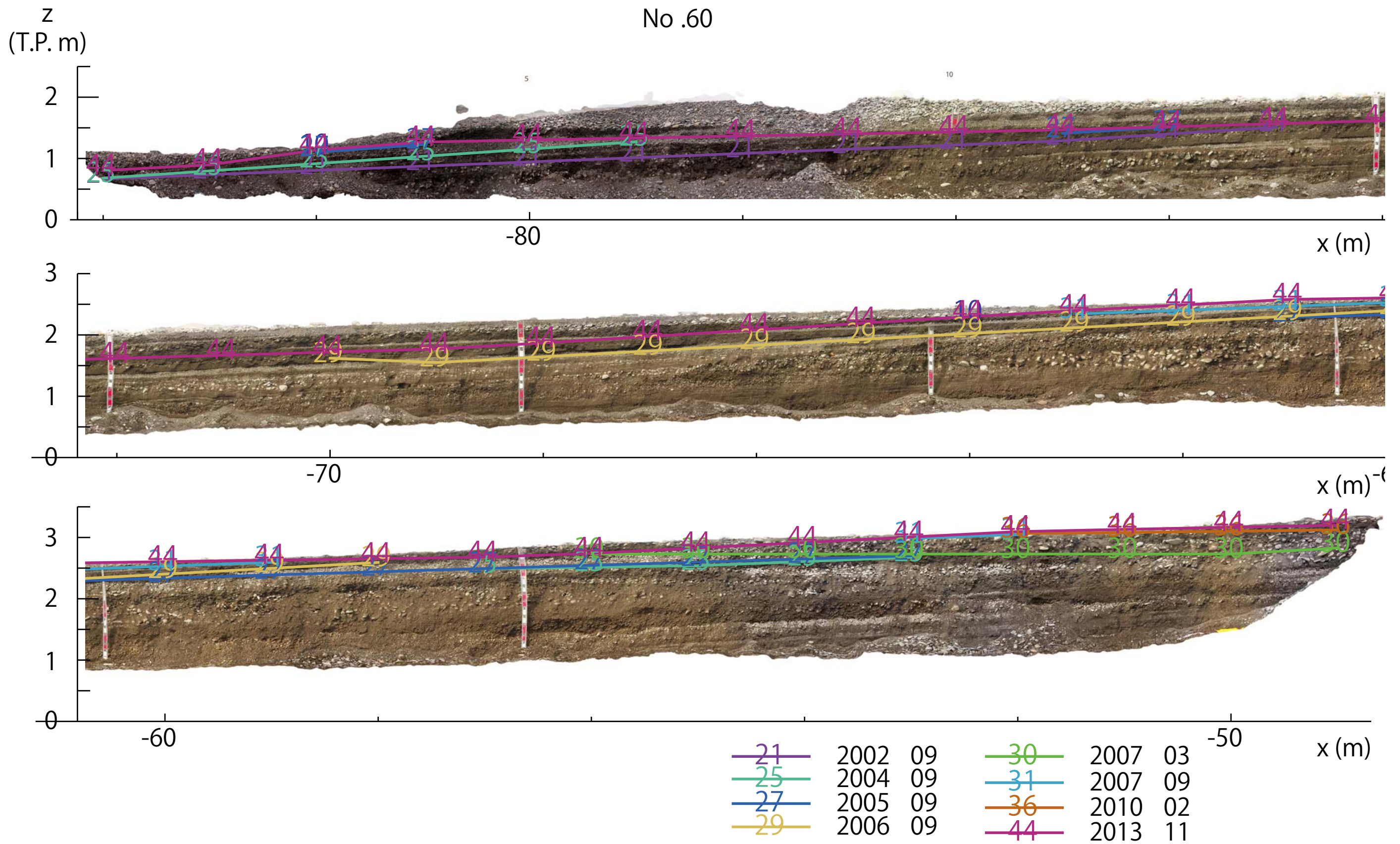


図-2.2.10a 堆積層露出面のオルソ画像 (No.60) (2014 年 2 月 19 日) と層理面の推定値



図-2.2.10b 堆積層露出面のオルソ画像 (No.60) (2014 年 2 月 19 日)

2.2.5. 供給源となっている安倍川河口左岸の中島地先（No.75）

a トレンチ掘削の位置と海浜状況（中島地先）

図-2.2.11 に中島地先の調査位置を示す．中島地先には離岸堤群が存在しており，これらの開口部で調査した．中島地先は，図-2.2.2 で示したように現在は堆積傾向であるが，川砂利採取による侵食が生じた時期に設置された離岸堤群が設置された．1966 年以降は砂利採取の規制が続けられており（中部地方整備局，2013），この離岸堤により土砂が捕捉され離岸堤背後と堤防の間に高い後浜地形が形成された．

中島地先の海岸断面形状は，図-2.2.5 で示したように $x=-50\text{m}$ から -150m 付近にバー形状が見られる．バー地形は砂成分が豊富な海岸で見られることから，安倍川から砂成分も多く排出されていると推定される．これが，駒越南町地先（No.60）との断面形状からの大きな違いとなっている．

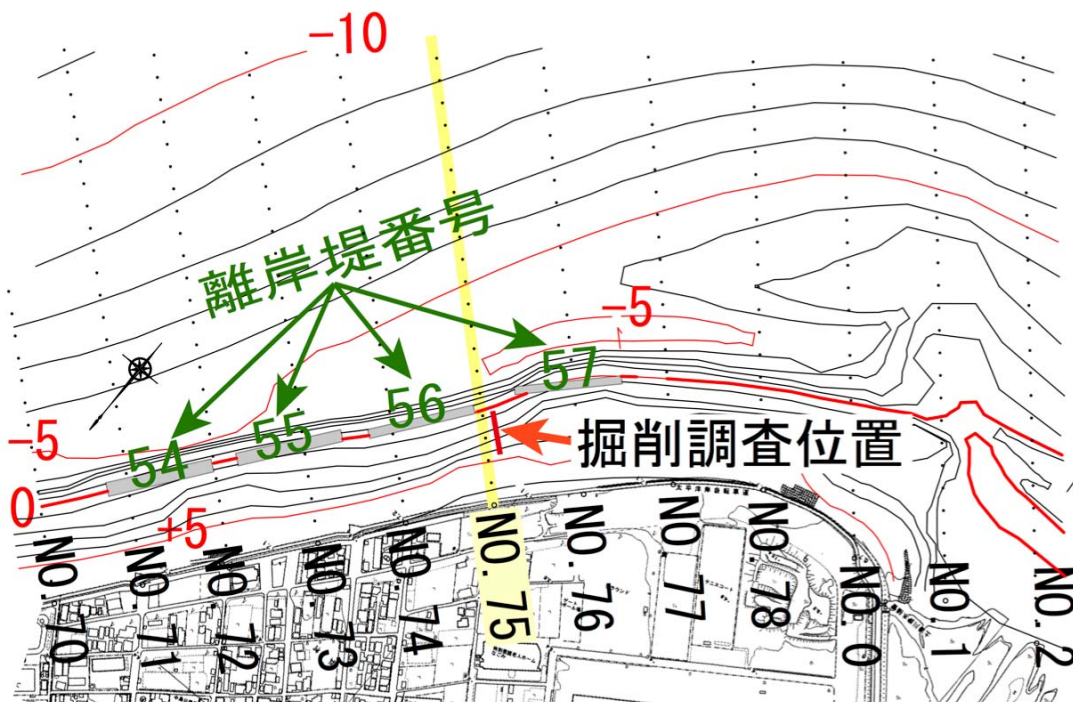


図-2.2.11 中島地先（No.75）のトレンチ掘削の位置

写真-2.2.5 は，海浜の状況を沿岸漂砂下手側に向かい撮影したものである．離岸堤に繋がった礫で覆われたバームが切れ目無く続いている．背後の堤防までは距離が有り広い海浜となっている．写真-2.2.6 は，沿岸漂砂上手側（安倍川河口側）を撮影したものである．離岸堤背後のトンボロ斜面に多数の大型の流木が打ち上がっている．また，この写真から汀線付近の表面底質は砂であることが分かる．



写真-2.2.5 漂砂下手側の状況（2014年2月20日）



写真-2.2.6 漂砂上手側の状況（2014年2月20日）

写真-2.2.7 で海浜の状況とトレンチで露出した堆積層を比較する。この写真はバームより背後の表面がほとんど砂となっている後浜部分である。掘削露出面を見ても砂が多いことが分かる。この測線で特徴的なのは、河口近傍であるため木質系の漂着物が多数の層に固まり状で埋設されている点である。また、前の写真の前浜とバーム表面では礫のみが見られたが、写真-2.2.8 で見られるように礫が集中的に存在するのはバームのみで、掘削露出面にも大量な礫で構成される部分は見られない。



写真-2.2.7 後浜付近に埋まっていた木質系漂着物（2014年2月20日）



写真-2.2.8 トレンチ全景とバーム，離岸堤の状況（2014年2月20日）

b 定期海岸断面測量から得られる露出面縞模様の推定（中島地先）

2.1.2.a 節で示した方法で推定した堆積層露出面の縞模様を図-2.2.12 に示す。線番号 24 の 2001 年 9 月が残存する最も古い断面となる。

線番号 25 の 2002 年 3 月が $x = -60\text{m} \sim -62\text{m}$ および $x = -70\text{m} \sim -78\text{m}$ に見られることから、2001 年 9 月から 2002 年 3 月の間に、1.5m 程度の堆積が生じたこと、それ以降も堆積が生じたが、2006 年と 2007 年に大きく侵食を受けて、その後に堆積傾向へ転じた。

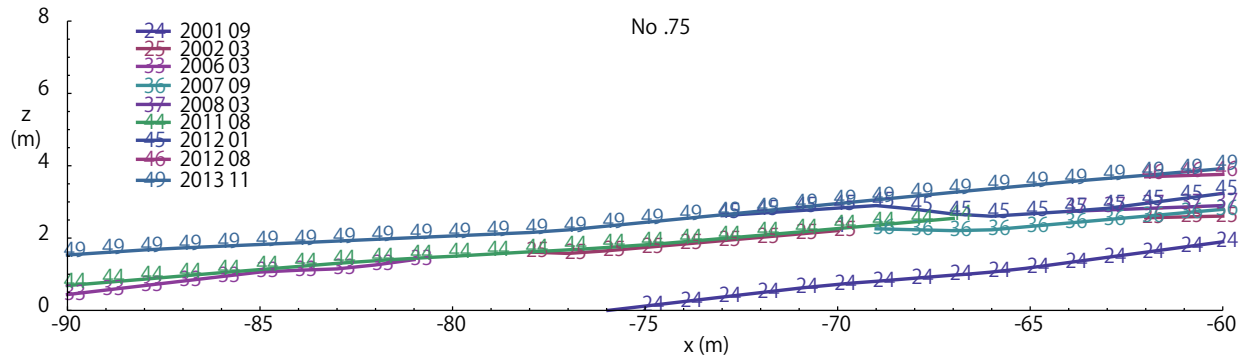


図-2.2.12 定期海岸断面測量から推定した露出面縞模様（No.75）

c 露出面の解析（中島地先）

2.1.2.b 節で示した方法により、合成されたオルソ写真を図-2.2.13a（現存する地表面の推定線有り）および図-2.2.13b（現存する地表面の推定線無し）に示す。岸沖方向に長いため2つに切断して示してある。図-2.2.13a中の複数の線は、図-2.2.12の断面測量残存線を縮尺を合わせて重ね合わせた。

2002 年 3 月の表層部と見られるバーム背後に残った流木が埋もれ残存している。その後、この流木等が被覆となり 2011 年 8 月までこの区間を保護していた可能性がある。 $x = -69\text{m}$, $z = 2.3\text{m}$ 付近で、2002 年 3 月の断面形状が 2007 年 9 月の断面で切られた痕跡が見られる。

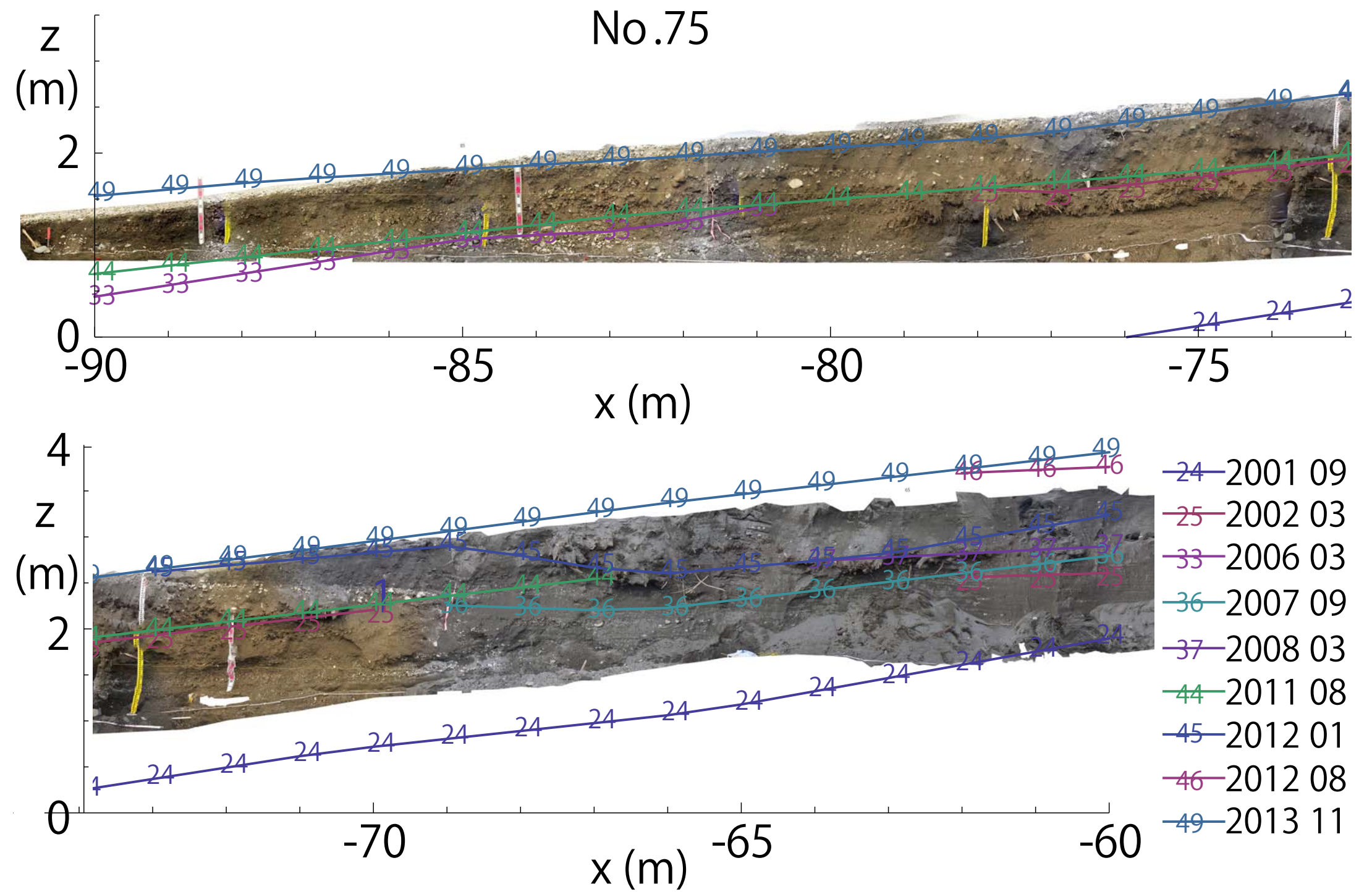


図-2.2.13a 堆積層露出面のオルソ画像（中島地先）（2014年2月20日）と層理面の推定値(No.75)

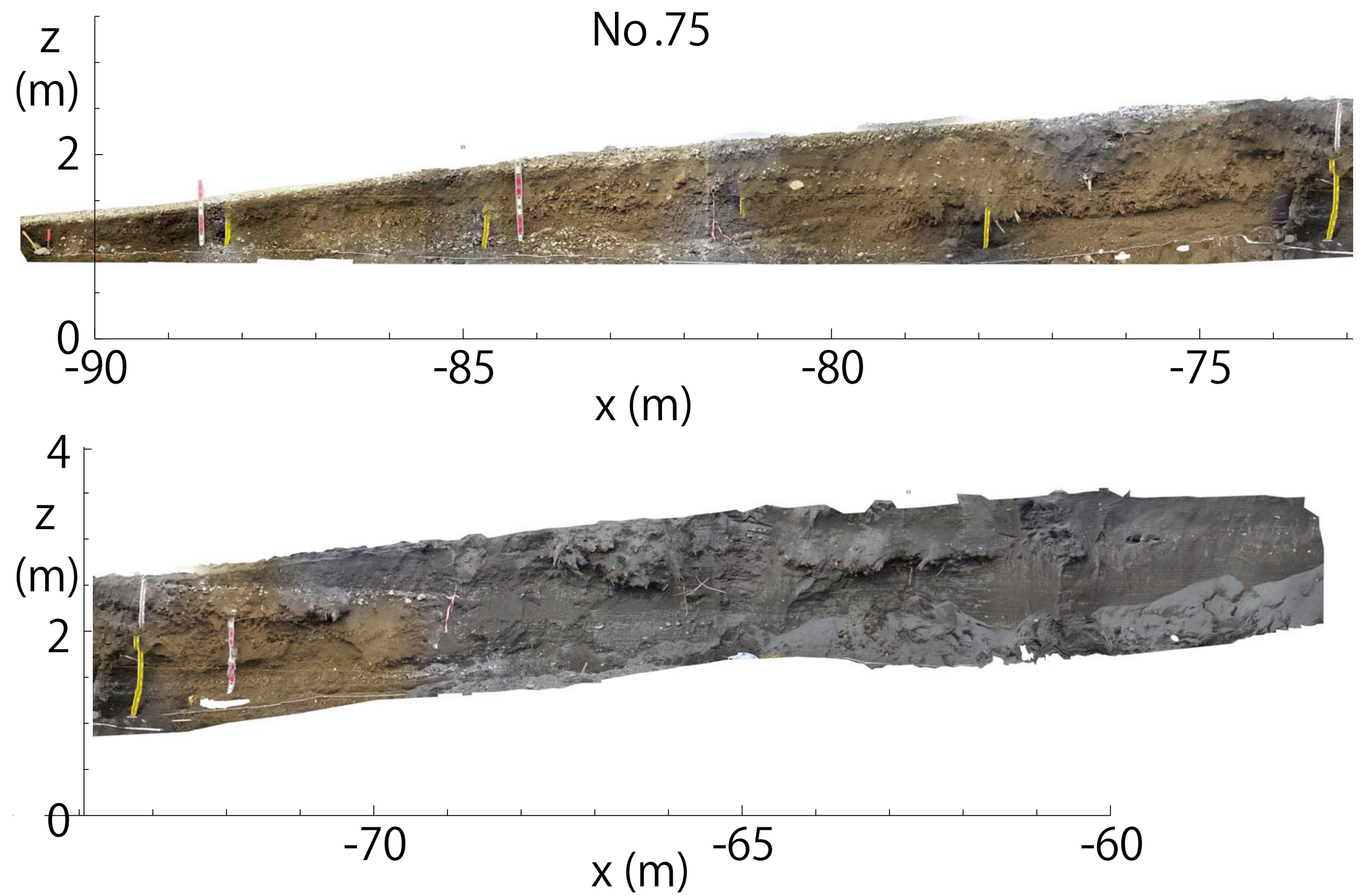


図-2.2.13a 堆積層露出面のオルソ画像（中島地先）（2014年2月20日）と層理面の推定値

2.2.6. 静岡・清水海岸のトレンチ調査の考察

a 堆積層の模式図

3 測線の堆積状態の違いを比較しやすいようにするため、オルソ写真から抽出可能な層理面をトレースして測線毎に模式図を図-2.2.14 として作成した。図中で堆積層の内容別に塗り分けているが、粒度分析の結果によるものではなく目視による分類である。また、赤字で示した箇所から堆積層の構成材料を採取し粒度分析を行った。

三保飛行場前 (No.13) の図-2.2.14 (上) は、図-2.2.7b を模式化した図である。この層には、礫のみ層が見られない。2.2.3.c 節で述べたように、一見、分級していない混合状態のように見えるが、礫一つ一つの長軸方向の向きを見ると、礫が規則的に配置されていることが分かる。これを手掛かりに、この部分の層理面を推定して模式図に示した。この状況から層としては明瞭でないものの何度かの波で類似した環境下（例えばひと時化の間）で形成された堆積の集合であることが推定される。

一方で、これよりも上、つまり最近の層では、層厚があまり厚くなく明瞭に区別ができるほど層を構成する粒径が異なるものが交互に堆積している。それらは、薄く長く連なる層が多い。また、岸側に向かい下がる面はほとんど存在しない。

駒越南町地先 (No.60) の図-2.2.14 (中) は、オルソ図である図-2.2.10b を模式化した図である。推定残存線が記載されている図-2.2.11 を参照しつつ、層の切り込み状況や傾きの状況から判読すると、右下側の古い堆積層と左上側の新しい部分を明瞭に分けることができる。また、新しい層には、陸側へ下がる勾配の部分は存在せず概して勾配が大きい。これは、新しい層が形成された際の海浜幅が狭く、バームの背後に形成されなかったことが原因である。

中島地先 (No.71) の模式図は、図-2.2.14 (下) であり図-2.2.13b を模式化した。この測線の特徴は、木質系の漂着物が多数埋没している点、砂が主体となる層がほとんどである点、陸側へ下がる勾配が多数存在している点である。前の 2 点については、調査地点が河口近傍であることに主に起因している。最後の岸へ向かって下がる勾配については、三保飛行場や駒越南町地先において見られるバーム等の大量堆砂時の背後に生じる勾配だけでなく、その上に形状を型取るように堆積する層が多く見られる。

3 カ所を比較すると中島地先が砂に礫が混じるものが主体、駒越南町地先では礫が主でそこへ砂が混じり、三保では上側ではそれらが交互に岸側下部では砂に礫が混じる構造となっている。さらに、中島地先では 17m 付近で既に 3m を越える高さとなっているが、駒越南町地先では 45m で越えるようになる。

駒越南町地先の堆積層は、全体に薄くなっており、これは古い層についても同様の傾向がある。これらの層は前述のように、礫が主体の層で砂が少なくなっている。しかし、下手側の三保飛行場前では砂が多く含まれている。これらのみからでは推測に過ぎないが、この区間の汀線前進が鈍いことと関係する可能性がある。

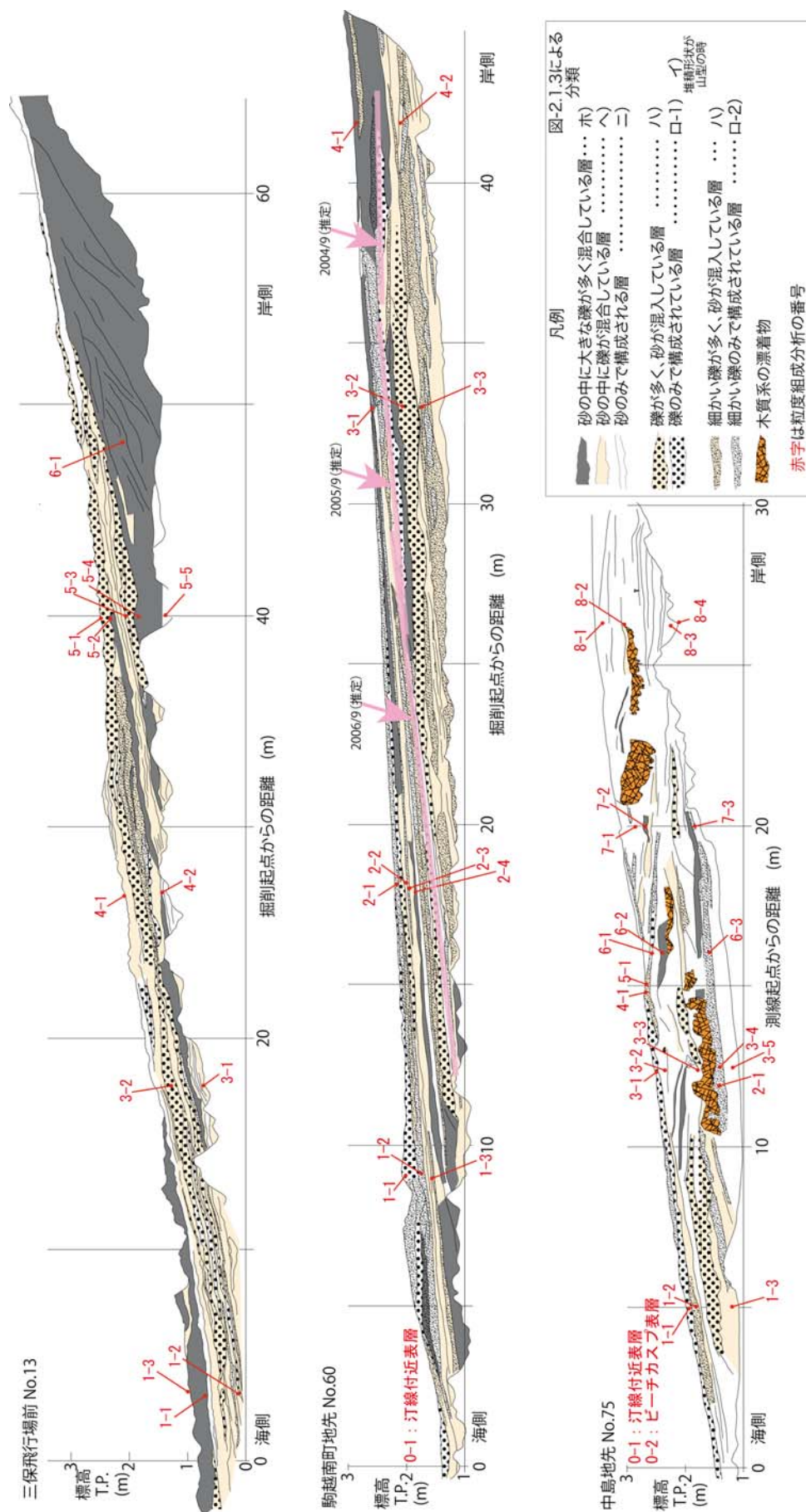


図-2.2.14 静岡・清水海岸の堆積層の模式図

a 層に含まれる礫と砂の比率

図-2.2.14 に赤字で示した箇所で採取した材料の粒度試験結果を組成別に大別したものを図-2.2.15 に示す。漂砂下手の三保飛行場前 No.13 を最上段とし漂砂上手側に向かい順に配置した。採取は、図-2.2.14 からわかるように主として礫成分が多い層を対象とした。採取番号は汀線側から岸側へ、また枝番号を表層から下層へ振ってある。したがって、番号が大きいと岸側となり、さらに枝番号が大きいものは古い層のものとなる。

多くは礫層から採取しているにもかかわらず、漂砂源（つまり最上手）である河口左岸の中島地先 No.71 と漂砂系末端側の三保飛行場前 No.13 を砂成分の割合について全般で比べると、河口左岸では多く、最下手の三保飛行場前 No.13 では少なくなっている。ただし、測量開始以前と考えられる 5-3 より後の番号の採取点から、かつては三保飛行場前の陸側では砂成分が多かったことが示されている。したがって、安倍川から砂成分を多く含んだ土砂供給があれば、三保まで到達すると推察できる。現状では、No.71 の砂成分の割合が近年側ほど少なくなっていることから安倍川からの砂成分の供給が減少している可能性が推定できるが、これに加えて離岸堤群やヘッドランド群による沿岸方向の土砂移動の抑制やサンドリサイクルの繰り返しにより、砂成分が少しずつ損失している可能性は否めない。

清水海岸駒越南町付近（No.60）では、汀線の回復が鈍化していることを図-2.2.2 で述べたが、この区間では、堆積が進まない原因として海岸線方向や海底の地形形状により外力が西側と比べて沿岸漂砂外力が大きくなることも考えられ、図-2.2.14 の模式図および図-2.2.15 から岸側で得られるかつての堆積状況からも堆積による汀線の前進が小さかったと推察される。それは、各堆積層の厚さが薄いことと陸側の砂成分が少なくなっていることから推察できる。この地点と比べて、河口左岸の中島地先 No.71 および 三保飛行場前 No.13 の堆積層が厚い岸側では砂成分の割合が高くなっており、堆積環境となった場合には砂成分の割合が後浜の形成に重要な条件になると推定される。

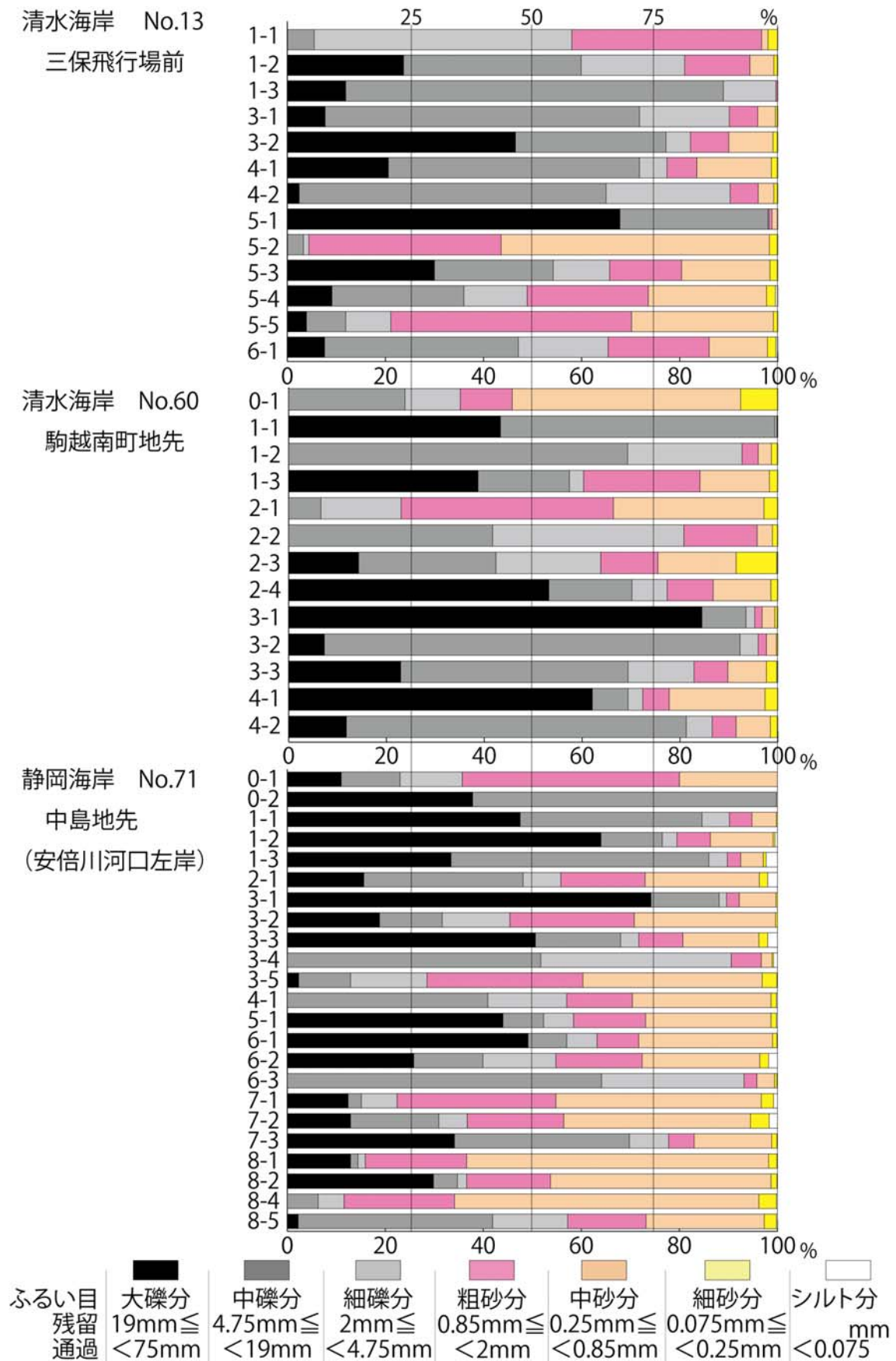


図-2.2.15 静岡・清水海岸の堆積層の粒度組成

2.2.7. 静岡・清水海岸のまとめ

静岡・清水海岸の漂砂系の供給源，末端の砂嘴と中間地点の 3 地点において，砂礫混合海浜の形成過程を解明するためのトレンチを初めて掘削し，堆積状態と堆積層の構成，代表的な層と岸沖方向の地点でのサンプリングによる粒度構成を調べた．主に次の点が見出された．

- 1) トレンチの露出面で見られる縞模様である残存する地表面と測量結果を重ね合わせることで大まかな堆積時期を知ることができた．
- 2) 3 地点の堆積層の比較から，厚く岸沖に長い堆積層は砂で構成されるか砂が主体となっている．
- 3) 侵食が激化する以前と見られる深い方の堆積層は，砂が主で構成されるものが多い．一方で，近年の状況となる海側は，礫の割合が多くなっている．
- 4) 堆積波の到達が遅れている駒越南町地先付近の状況と他の地点の比較から，かつての層厚も薄く礫成分が多いことから積極的に堆積しない区間と推定される．

参考文献

- 石川仁憲・宇多高明・水野良幸・佐藤雅史・三波俊郎(2016)：静岡清水海岸における sand body の移動実態と養浜効果の検証,土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.72, No.2, pp.I_133-I_138.
- 宇多高明・板橋直樹(1997)：静岡・清水海岸における侵食・堆積波の伝播，海岸工学論文集，第 44 巻，pp.631-635.
- 国土交通省中部地方整備局（2013）：安倍川総合土砂管理計画，
http://www.cbr.mlit.go.jp/shizukawa/17_sougo/abe_data/keikaku.pdf，2018.6.13 確認.
- 静岡県 (2013)：平成 24 年度 清水海岸侵食対策検討委員会資料，
http://shimizukaigan.doboku.pref.shizuoka.jp/wp-content/uploads/page/shiru/document/20130219_document.pdf.
- 静岡県交通基盤整備部河川砂防局(2016)：第 3 回安倍川総合土砂管理計画フォローアップ作業部会（国土交通省中部地方整備局静岡河川事務所開催），資料 3「海岸領域における対策状況の報告」，
http://www.cbr.mlit.go.jp/shizukawa/17_sougo/abe_flowup/03/s3.pdf.

2.3. 富士海岸におけるトレンチ調査

2.3.1. 富士海岸の概要

富士海岸は、図-1.2.2 に示した沼津市から蒲原町まで約 24km の漂砂系である。海象観測所としては原観測所と富士田子の浦観測所がある。漂砂源である富士川は、流域面積 3,990km² を有している。静岡・山梨県境より下流側では河床低下により鉄道橋等に被害が生じたため、静岡県側において積極的な砂利採取規制が行われて来た。

また、潤井川の河口に発達した田子の浦港や背後低地の浸水防御のために掘削された昭和放水路等の施設により西から東への沿岸漂砂が遮断されたために、海岸侵食が発生している。

一方で、富士山大沢崩れから大沢扇状地に堆積した土砂は出水時に土石流の被害を及ぼすため、砂防事業と連携して有効な粒径を 50～150mm として粒度調整されて富士海岸へ養浜されている。養浜材料を大沢扇状地からダンプトラックで搬送し、写真-2.3.1 に示すように海に向かって盛土を繰り返す。また、養浜量を補うために単位体積重量と粒度（大沢扇状地と同様）を指定して購入碎石を陸上と海上で養浜している。富士海岸の海上養浜は、海底勾配が急峻であるために汀線近くまで大型のグラブ付自航運搬船（ガット船）が近づくことができるので、写真-2.3.2 に示すようにガット船から直接汀線付近へ養浜材料が投入される。



写真-2.3.1 昭和放水路東側の陸上養浜の状況(2000年3月2日)



写真-2.3.2 昭和放水路東側の海上養浜の状況(1998年10月7日)

2.3.2. 測線の選定

トレンチ掘削調査を実施した3地点は、図-2.3.1に示すように昭和放水路東側の養浜区間から漂砂下手の養浜材料が沿岸漂砂により供給される東柏原新田地先(No.43付近)、田子の浦港と昭和放水路の間に位置し消波工を連続的に設置することで海岸線後退を押さえ込んでいる檜新田地先(No.51付近)、土砂供給が改善された富士川の河口に近い三四軒屋地先(No.79付近)である。

掘削調査は、2015年2月3日(東柏原新田地先)、2月4日(檜新田地先)、2月5日(三四軒屋地先)に実施した。以下の掘削調査結果は、漂砂下手から漂砂源方向の順で、掘削を行なった順に示す。

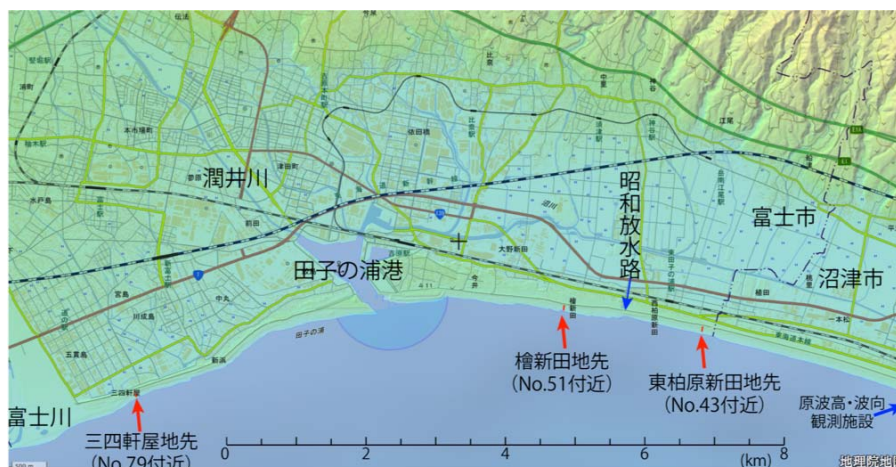


図-2.3.1 調査位置

2.3.3. 礫養浜投入箇所の手側に位置する No.43

a トレンチ掘削の位置と海浜状況 (No.43)

東柏原新田地先の調査位置を図-2.3.2 に示す．富士海岸では，定期海岸地形測量が 1985 年から実施されている．この測線 No.43 の定期測量の結果から T.P.0 の岸沖位置を T.P.0 を挟む 2 点から割り出して，汀線位置の経年変化として図-2.3.3 に示す．この測線は昭和放水路の東側で卓越沿岸漂砂の下手となる．侵食の影響が到達する 1996 年頃までは有意なトレンド有していなかったが，侵食の影響が到達すると，急速に海岸線が後退したことがわかる．1998 年から昭和放水路東の No.48（測線間隔は 250m なので，約 1.25km 西）を中心に大規模養浜が開始されおり，その効果が 2004 年頃から発現し現在も養浜によって維持される海岸となっている．

写真-2.3.3 はバーム部分と掘削内部を，写真-2.3.4 はバーム背後の砂浜部分と露出面を撮影したものである．バーム自体は礫のみで構成されているが，その下には砂層と砂礫混合層の互層となっているのがわかる．バームの厚さは背後へ向かい徐々に減少するが，地表面では突然に砂ばかりとなり礫はまばらとなる．一方で，トレンチの露出面では，バーム以外でバームを構成する粒径の礫は多く見られない．

写真-2.3.5 に 1999 年 2 月 12 日のほぼ同地点の状況を示す．養浜が開始されて約 2 年が経過した時点の状況である．線状にうち上がっている漂着物よりも海側では，地表面の色が富士砂防から搬入された火山系の砂礫により赤黒く異なっている．その中に養浜材の大礫が点在している．この時期には礫が多くなく，バームの高さが低く平坦であった．写真-2.3.3 や写真-2.3.4 と比べると，礫養浜により海浜の様相が大きく変化したことがわかる．

写真-2.3.6 に漂砂上手の養浜区間と昭和放水路の状況を示す．ほぼ同様なバーム高さで連なっているのがわかる．



図-2.3.2 東柏原新田地先の調査位置

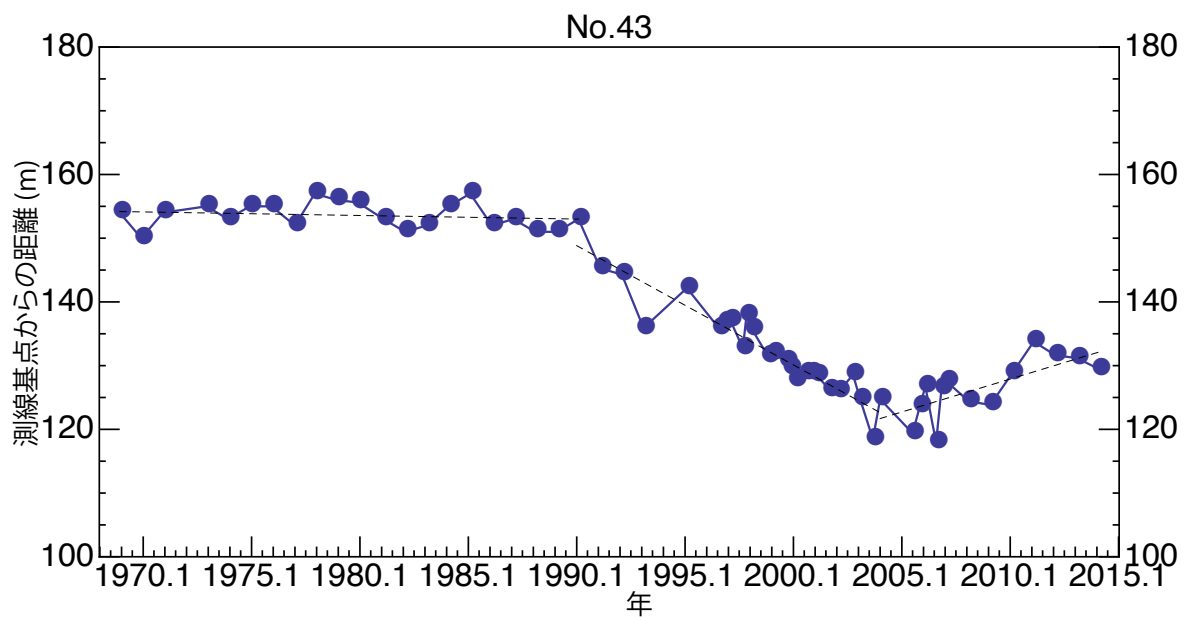


図-2.3.3 No.43 の T.P.0m 位置の変化



写真-2.3.3 トレンチから下手方向の海浜状況と掘削面（バーム部分）
(2015 年 2 月 3 日)



写真-2.3.4 トレンチから下手方向の海浜状況と掘削面（バーム岸側）
(2015 年 2 月 3 日)



写真-2.3.5 養浜開始から間もない時点の No.43 近傍の様子(1999 年 2 月 12 日)



写真-2.3.6 トレンチ下手方向から上手に向かい昭和放水路を望む
(2015 年 2 月 3 日)

b 定期海岸断面測量から得られる露出面の縞模様の推定 (No.43)

2.1.2.a 節で示した方法により，露出面の縞模様を推定したのが，図-2.3.4 である．富士海岸では，1968 年から定期海岸断面測量が実施されている．

残存線する最も古い線は，線番号 44 で 2003 年 9 月の測量のものである．昭和放水路東側への養浜は 1996 年から実施されている．2003 年 9 月より堆積が生じて，2013 年 2 月（線番号 57）までに順調に堆積したものの，2014 年 2 月（線番号 58）までに高波浪の遡上により $x=-86\text{m}$ より汀線側のバームを削り岸側へ堆積させた．

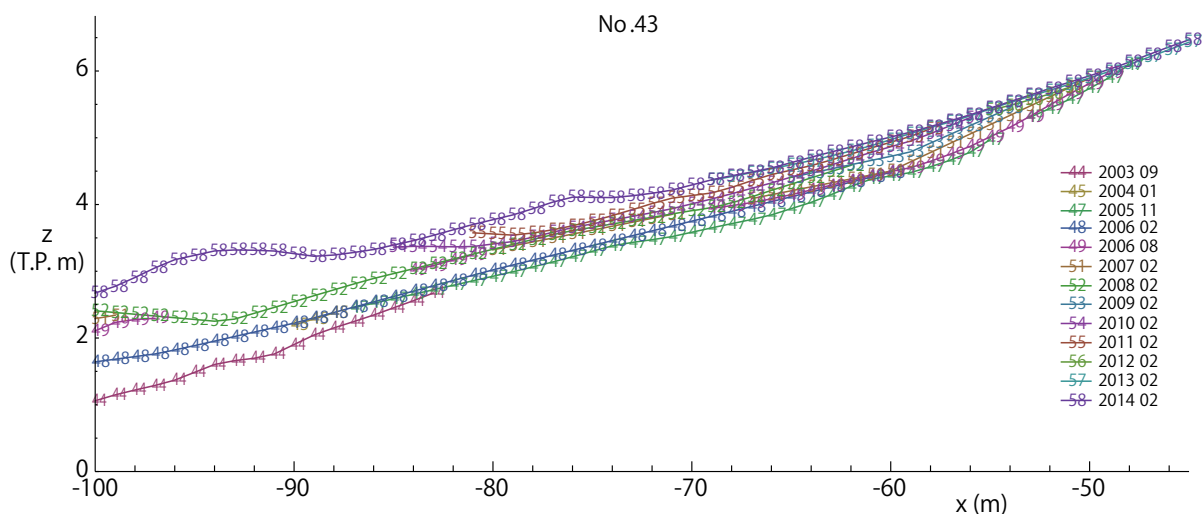


図-2.3.4 定期海岸断面測量から推定した現存する地表面 (No.43)

c 露出面の解析 (No.43)

トレンチの堆積層の露出面を撮影した写真から合成されたオルソ写真を図-2.3.5a（現存する地表面の推定線有り）および図-2.3.5b（現存する地表面の推定線無し）に示す。岸沖方向に長いため 3 つに切断して示してある。図-2.3.5a 中の複数の線は、図-2.3.4 の断面測量残存線の縮尺を合わせて重ねたものである。

写真-2.3.3 でも述べたように礫が集中して厚く山状に存在するのはバームの部分のみとなっている。堆積層としては、バームの特徴である山型が見られない。

前述の線番号 44 および線番号 47 を境に堆積物層の質感と色が明瞭に異なっている。線番号 44 が 2003 年 9 月、線番号 47 が 2005 年 11 月であり、いずれも養浜開始後であることから、この層理面を境に人為的な供給材による堆積層か自然に到達した海浜材料による堆積層かで分かれている。このことは、上側は養浜材に用いている大きな礫が多く見られ、下側は大きな礫が見られなくなっていることにも現れている。また、岸側（最下段）では下側の層が厚くなっている。

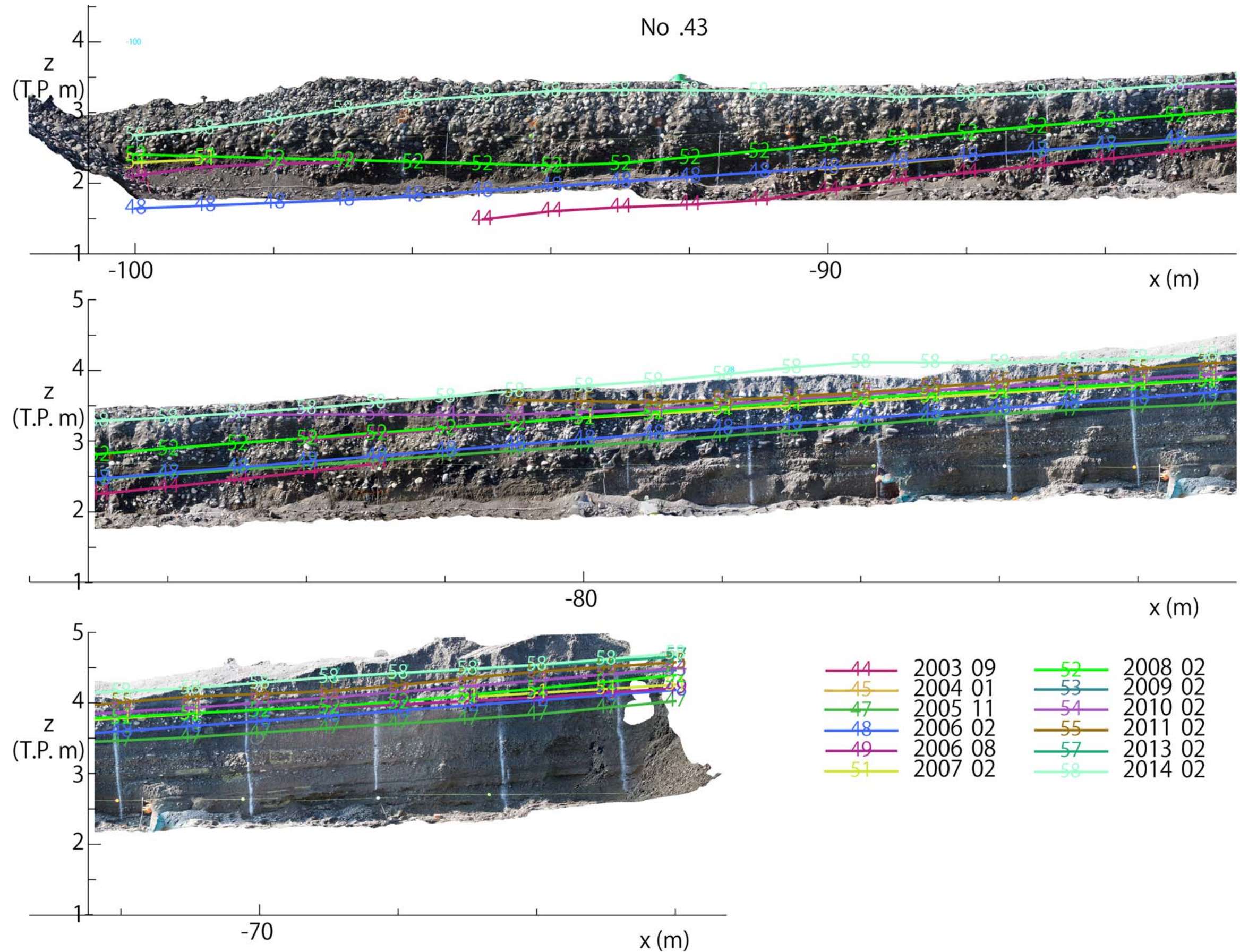


図-2.3.5a 堆積層露出面のオルソ画像(2015年2月3日)と現存する海浜面の推定線 (No.43)

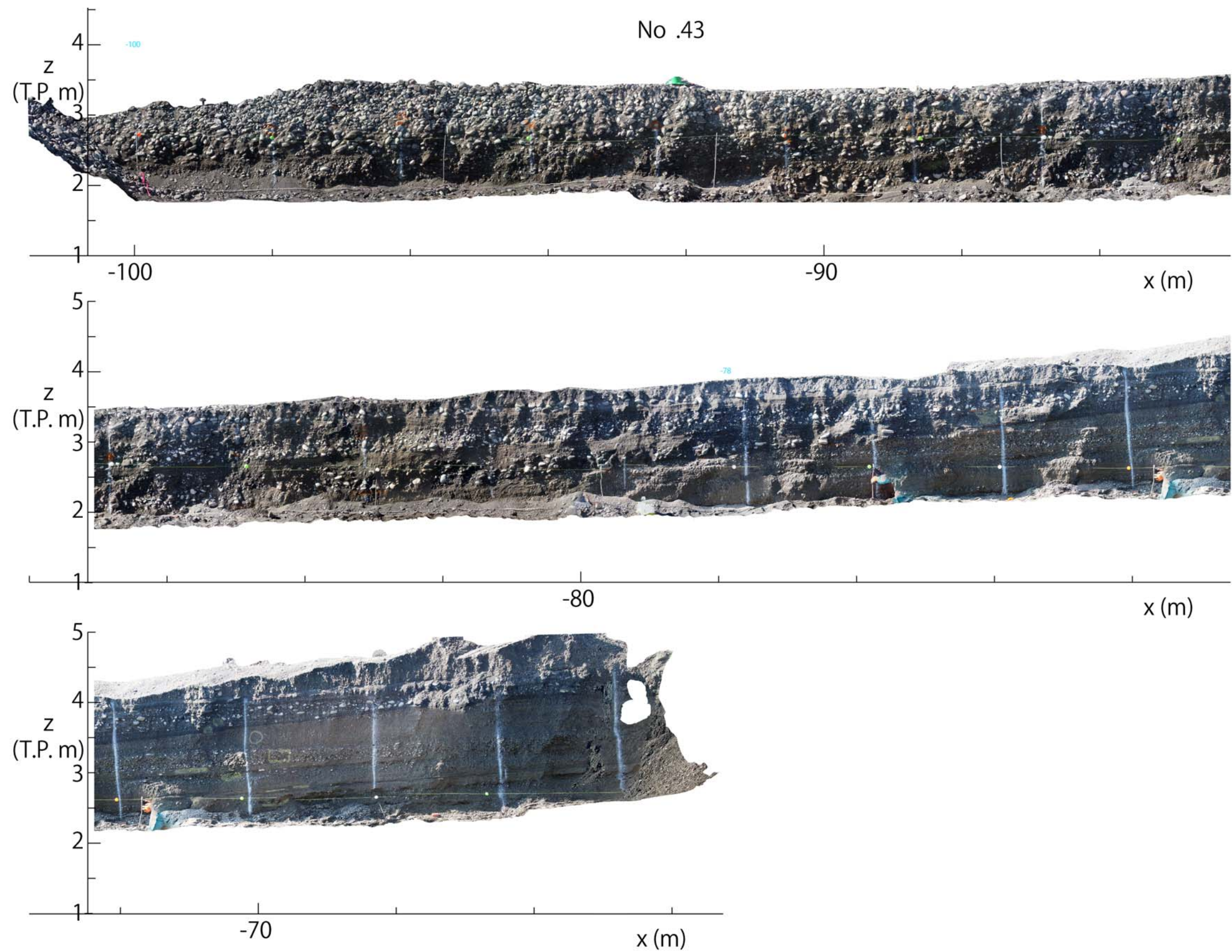


図-2.3.5b 堆積層露出面のオルソ画像(2015 年 2 月 3 日) (No.43)

2.3.4. 檜新田地先 (No.51) の調査結果

a トレンチ掘削の位置と海浜状況 (檜新田地先 No.51)

図-2.3.6 に檜新田地先の調査位置を示す。調査地点は、田子の浦港と昭和放水路に挟まれた区間で 1978 年に設置された 12 号消波堤と 13 号消波堤の開口部である。田子の浦港の中央航路は、-10m を維持するように浚渫されるために、ここを沿岸漂砂が越えることはできず、富士川からの沿岸漂砂は完全に遮断されて土砂供給は見込めない。一方で、東柏原新田側への沿岸漂砂を阻止する効果となる昭和放水路は、上手側へは突堤と同様の効果を発揮する。さらに、昭和放水路を端部として消波堤が設置され、海浜材料の流出を抑制している。このため、この区間での汀線付近での沿岸漂砂は生じにくい。

写真-2.3.7 は、沿岸漂砂下手側である昭和放水路側の東向きに撮影したものである。消波堤の背後に部分的に比高が高く見える部分があるが、消波堤の背後をブロック製作ヤードとして使うために養浜した経緯もあり、必ずしも波の力だけでトンボロ状に堆積したものではない。写真-2.3.8 は、沿岸漂砂上手側の田子の浦港側（西側）を撮影したものである。下手側とほぼ同様に礫で覆われた海岸が広がっている。

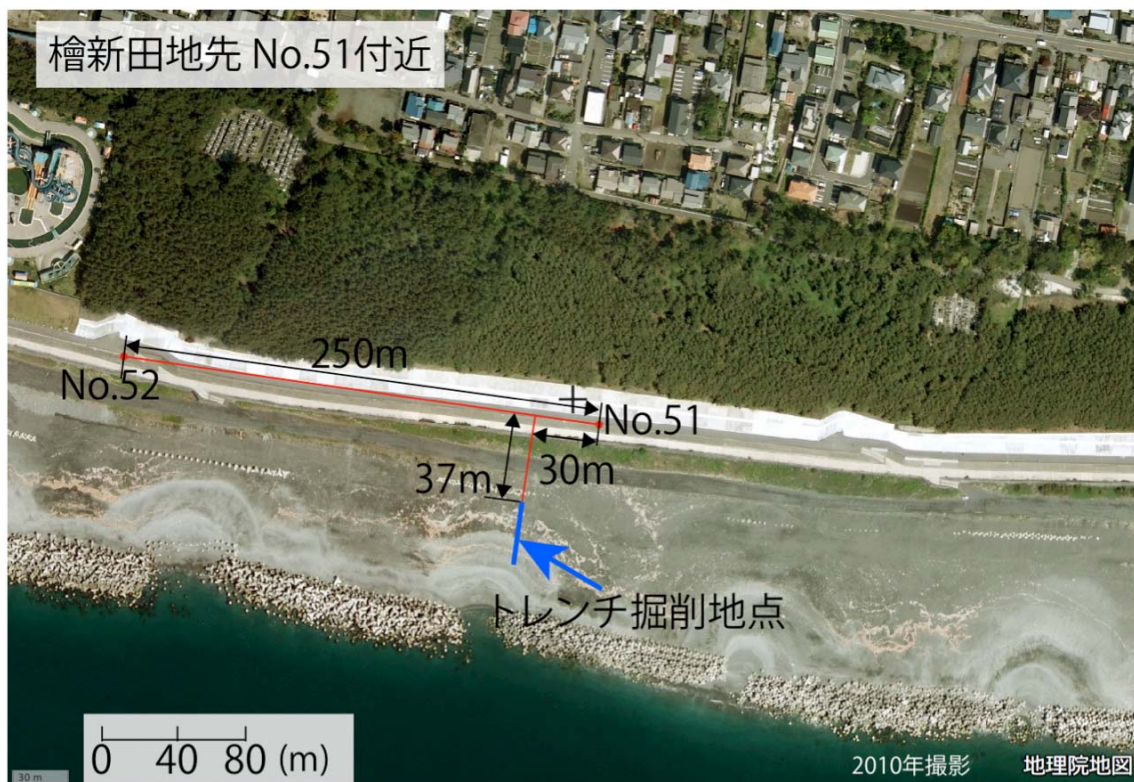


図-2.3.6 檜新田地先の調査位置



写真-2.3.7 下手方向の海浜状況 (2015 年 2 月 4 日)



写真-2.3.8 トレンチから上手方向の海浜状況と掘削面(2015 年 2 月 4 日)

b 定期海岸断面測量から得られる露出面の縞模様の推定 (No.51)

2.1.2.a 節で示した方法で推定した堆積層露出面の縞模様を図-2.3.7 に示す. 2010 年 2 月が残存する最も古い断面となる. 2012 年 9 月 30 日に台風 17 号が上陸しており, 國村ら(2014) によると河口部を除く全域で汀線の後退が生じた. 残存する線が著しく近年に偏っている. 一方で, $x=-73\text{m}$ より海側では, 2010 年 2 月や 2011 年 2 月がみられる.

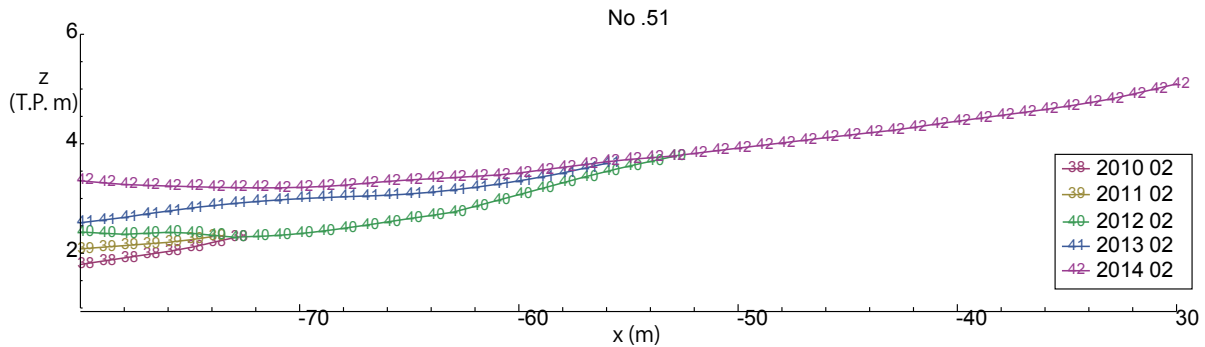


図-2.3.7 定期海岸断面測量から推定した現存する地表面 (No.51)

c 露出面の解析 (No.51)

2.1.2.b 節で示した方法により, 合成されたオルソ写真を図-2.3.8a (現存する地表面の推定線有り) および図-2.3.8b (現存する地表面の推定線無し) に示す. 岸沖方向に長いため 3 つに切断して示してある. 図-2.3.8a 中の複数の線は, 図-2.3.7 の断面測量残存線を縮尺に合わせて重ね合わせた.

この断面においても, 図-2.3.7 から定期海岸断面測量で残存する最下の測量時の地表面の線によって上下の状況が明瞭に区分できる. No.43 と同様に, 近年で最も侵食された線番号 40 (2012 年 2 月) もしくは線番号 42 (2014 年 2 月) より下は, 測量の記録ががなく測量開始より古いことになり, 1985 年より以前の堆積と言える. No.43 に比べて No.51 では, 砂の層と細礫の層が薄い厚さで多数互層となっている. 但し, $x=-42\text{m}$ 付近から岸側の底部では厚い砂に礫が混ざった層が見られる.

最上段で $x=-68$ 付近から海側へ礫のみで構成されるバームが形成されている. このほかにバームの形状をした堆積層として $x=-48\text{m}$ 付近から $x=-56\text{m}$ 付近までに饅頭を潰したような形状が見られるが, バームのように海側へ向かい前傾していないことや拡大すると堆積構造を有していないことから, 工事用の製作ヤードや工事用道路等の名残である可能性がある.

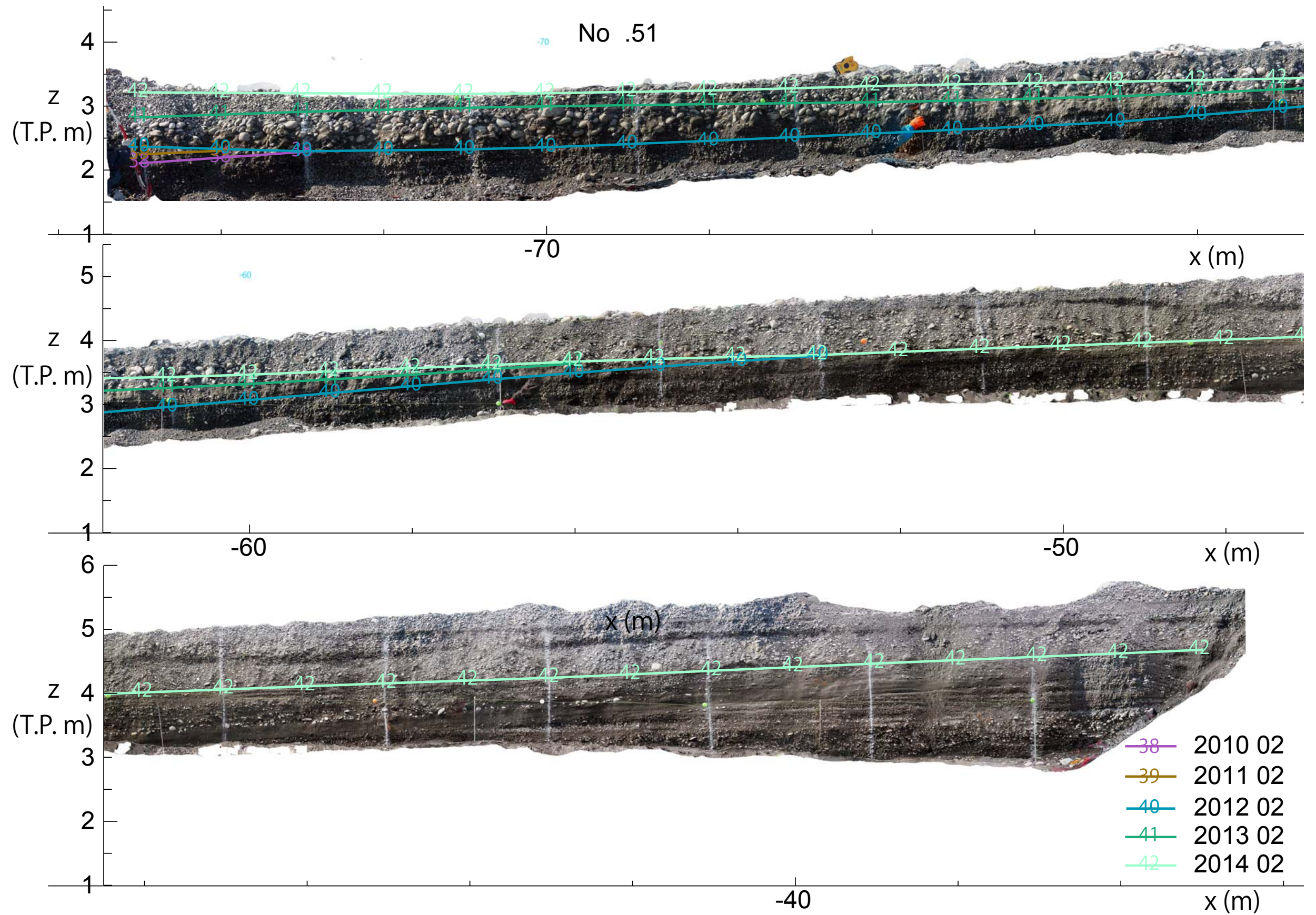


図-2.3.8a 堆積層露出面のオルソ画像(2015年2月4日)と現存する海浜面の推定線 (No.51)

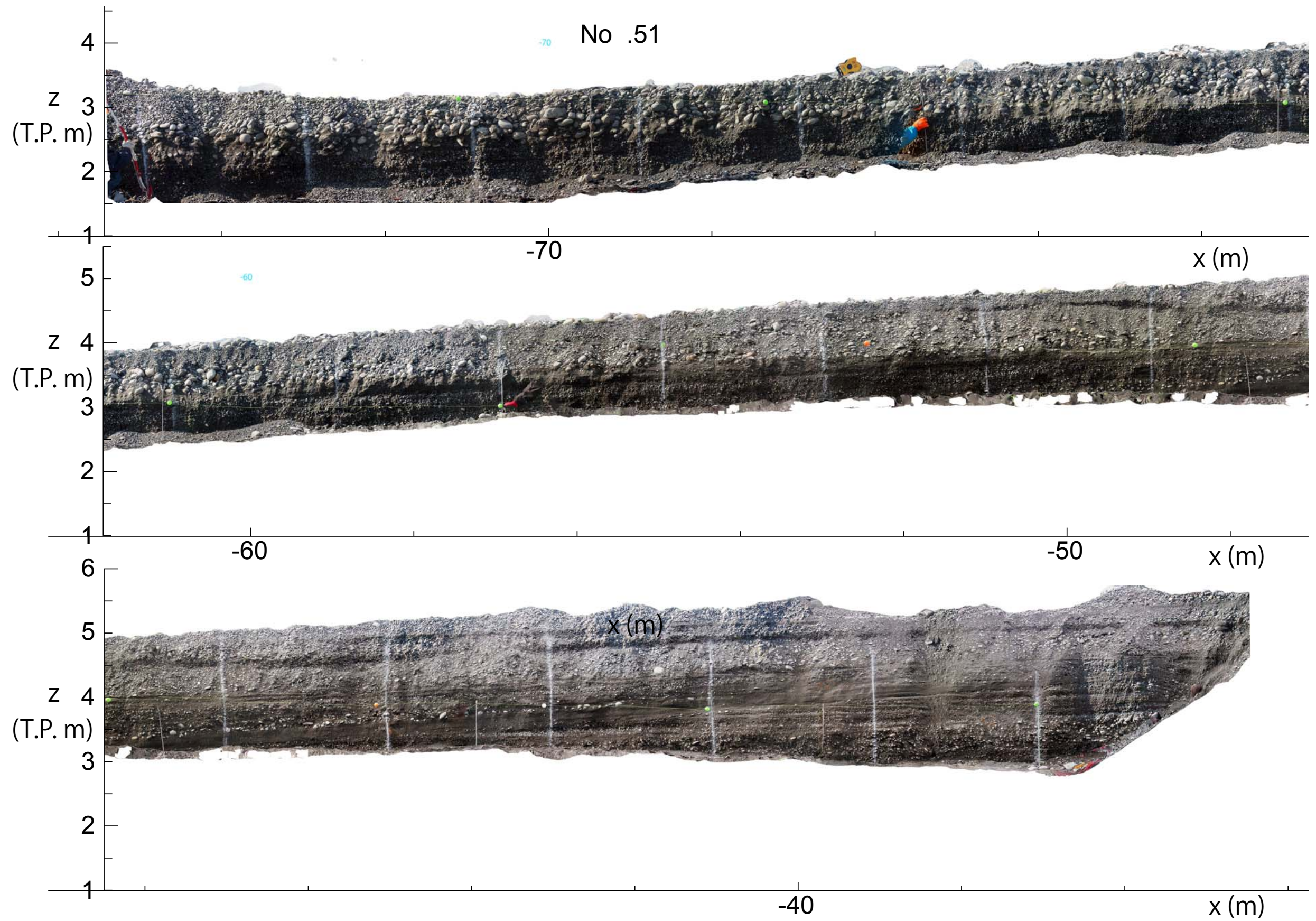


図-2.3.8b 堆積層露出面のオルソ画像(2015年2月4日)(No.51)

2.3.5. 供給源となっている富士川河口左岸の三四軒屋地先（No.79）

a トレンチ掘削の位置と海浜状況（No.79）

図-2.3.9 に三四軒屋地先の調査位置を示す。図の掘削地点から左手（西側）約 800m から富士川河口部となる。図-2.3.9 左下に見える小突堤状に設置された消波ブロック等と四角いコンクリート構造物は元富士樋管である。これにより東側（右手）で汀線が下がっているものの元富士樋管は頻繁に閉塞しており，ここを越えて漂砂が供給されている。また，汀線付近にある消波ブロック群は 1980 年に離岸堤として設置されたものである。

この地点は，富士川からの土砂排出が回復したことから堆積傾向となっている。図-2.3.10 は，No.79 より 500m 東の No.77 の断面変化を示したものである。1979 年に最も後退した後に回復している。x=90m から 100m に存在する消波ブロックは図-2.3.9 に見える離岸堤の延長線上にあり，1980 年に設置された離岸堤で，埋まりつつある。

写真-2.3.9 は，海浜の状況を沿岸漂砂下手側に向かい撮影したものである。離岸堤背後への堆砂量が多く，背後の盛土保護の消波工までフラットに近い面を形成している。写真-2.3.10 は，沿岸漂砂上手側（安倍川河口側）を撮影したもので，一直線状に人が立っているところがトレンチの掘削位置である。

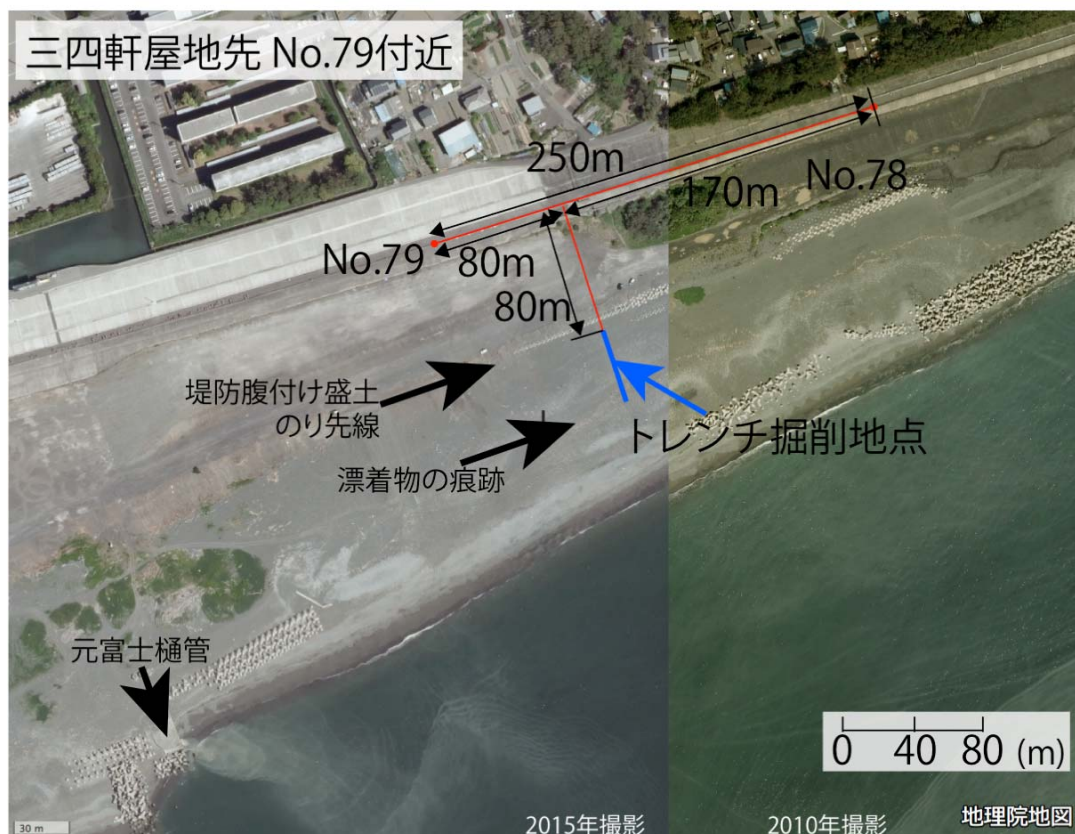


図-2.3.9 三四軒屋地先の調査位置

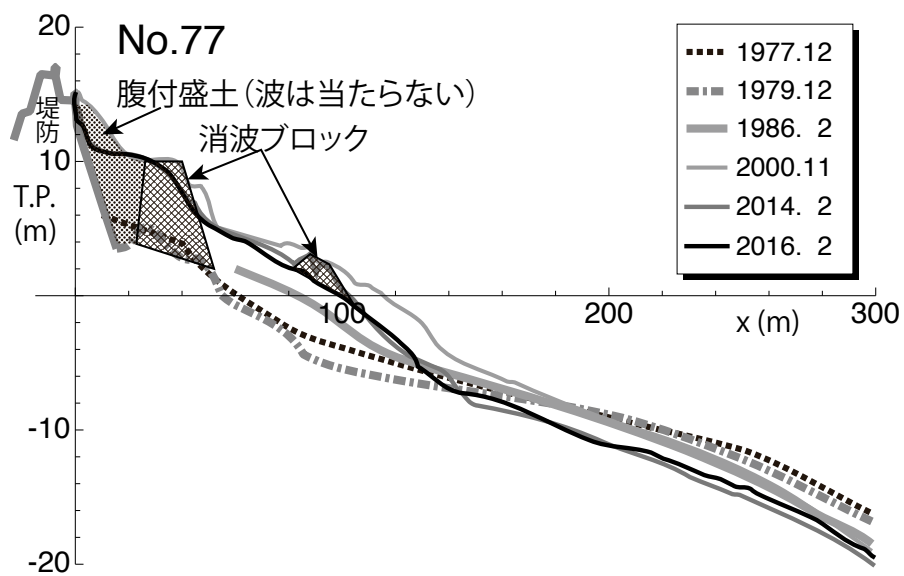


図-2.3.10 富士川の土砂供給の回復による断面形状の変化 (No.77)



写真-2.3.9 漂砂下手方向の海浜状況と掘削面 (上部) (No.79) (2015 年 2 月 5 日)



写真-2.3.10 トレンチ掘削位置と漂砂上手方向の海浜状況 (No.79) (2015 年 2 月 5 日)

b 定期海岸断面測量から得られる露出面の縞模様の推定 (No.79)

2.1.2.a 節で示した方法で推定した堆積層露出面の縞模様を図-2.3.11 に示す。この測線については、陸上部の測量密度が低い古いデータ (4 番～13 番) についても記載した。これらの古い推定線と近年の推定線を見比べると、1970 年代以降 (砂利採取規制以降) の堆積傾向となった漂砂環境で、平坦面が削られその前面に堆積するという形態が繰り返されてきたことがうかがえる。

線番号 42 (2012 年 2 月) から線番号 43 (2013 年 2 月) の間に厚い堆砂が生じている。この間には、有義波高で 5m を越える海象事象が 4 回生じていた。2012 年 9 月 30 日に上陸した台風 17 号による観測値は、富士田子の浦観測所および原観測所が欠測のため、久能海象観測所 (静岡県所管) によると 9 月 30 日 22 時に有義波高が 8.4m、有義波周期が 13.7 秒となっており、これに対応する最大波は 12.1m、最大波周期は 13.2 秒であった。

また、線番号 26 (1998 年 2 月) と線番号 27 (1999 年 2 月) の間も広がっており、大きな堆積が生じている。この間は、原観測所 (国土交通省所管) のデータが利用可能で、1998 年 3 月 20 日の寒冷前線の通過に伴う高波浪が年間で最大で、3 月 30 日 22 時に有義波高が 5.26m、有義波周期が 11.3 秒を記録している。この気象擾乱により有義波高 3m 以上かつ有義波周期 10 秒以上の状態が 9 時間継続し、その間の毎正時の最大波を平均すると 5.3m であった。

このように、台風来襲時や大きな気圧傾度が継続する等により生じた周期の長い波による海浜部の急激な堆積が示唆される。

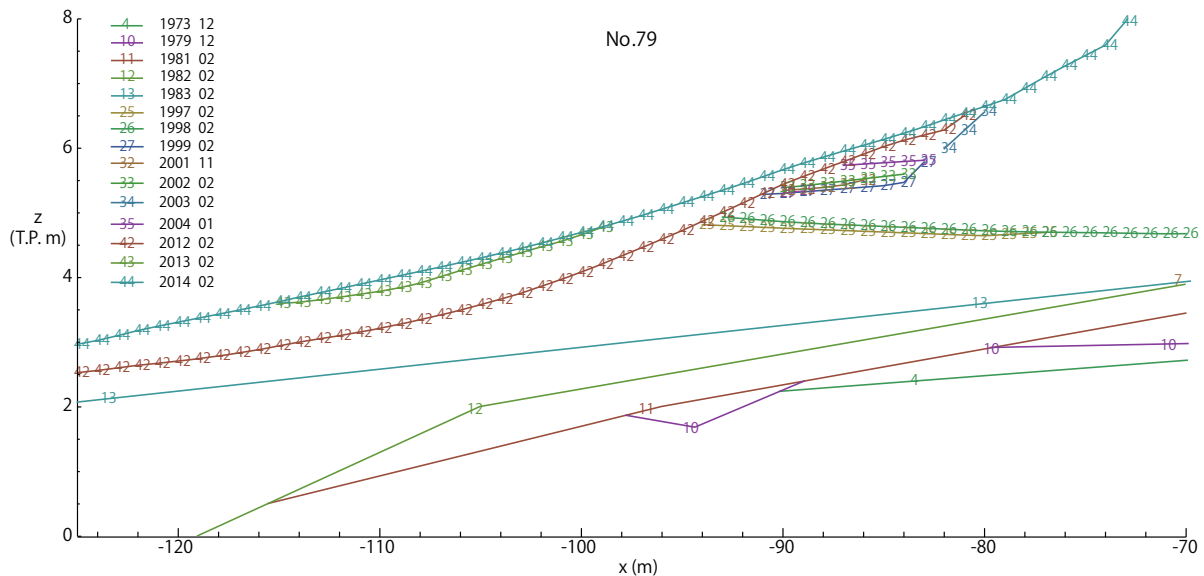


図-2.3.11 定期海岸断面測量から推定した現存する地表面 (No.79)

c 露出面の解析 (No.79)

2.1.2.b 節で示した方法により，合成されたオルソ写真を図-2.3.12a（現存する地表面の推定線有り）および図-2.3.12b（現存する地表面の推定線無し）に示す．岸沖方向に長いため3つに切断して示してある．図-2.3.12a中の複数の線は，図-2.3.11の断面測量残存線を縮尺を合わせて重ね合わせた．

図-2.3.11で線番号42（2012年2月）と線番号43（2013年2月）の間が厚いことを吟味したが，これが図-2.3.12aで最上段から3段目まで続く層として，後半は線番号44（2014年2月）に侵食されるが $x = -82\text{m}$ 付近まで続いている．この層の $x = -102\text{m}$ の混合状況を拡大したのが写真-2.3.11である．礫の並び方に指向性はなく，混合状態から急速に堆砂した状況となっている．しかし，岸側へ辿ると次第に波の遡上に会う指向性を示すようになっていく．これは，台風1217号により，汀線付近の底質が高波浪時に，巻き波型で巻き込まれたか，もしくはボア状の波により押し込められたものと考えられる．

一方で， $x = -93\text{m}$ から $x = -84\text{m}$ で見られる線番号26（1998年2月）と線番号27（1999年2月）の間については，数本の砂と礫の互層となっている．

また，中段の線番号43の下に T.P.3m から始まる小砂利玉石（細礫）の層を見ると，数カ所で大きく層内から細礫が崩れ出している様子が見られ，小砂利玉石（細礫）の層が脆弱であることが分かる．

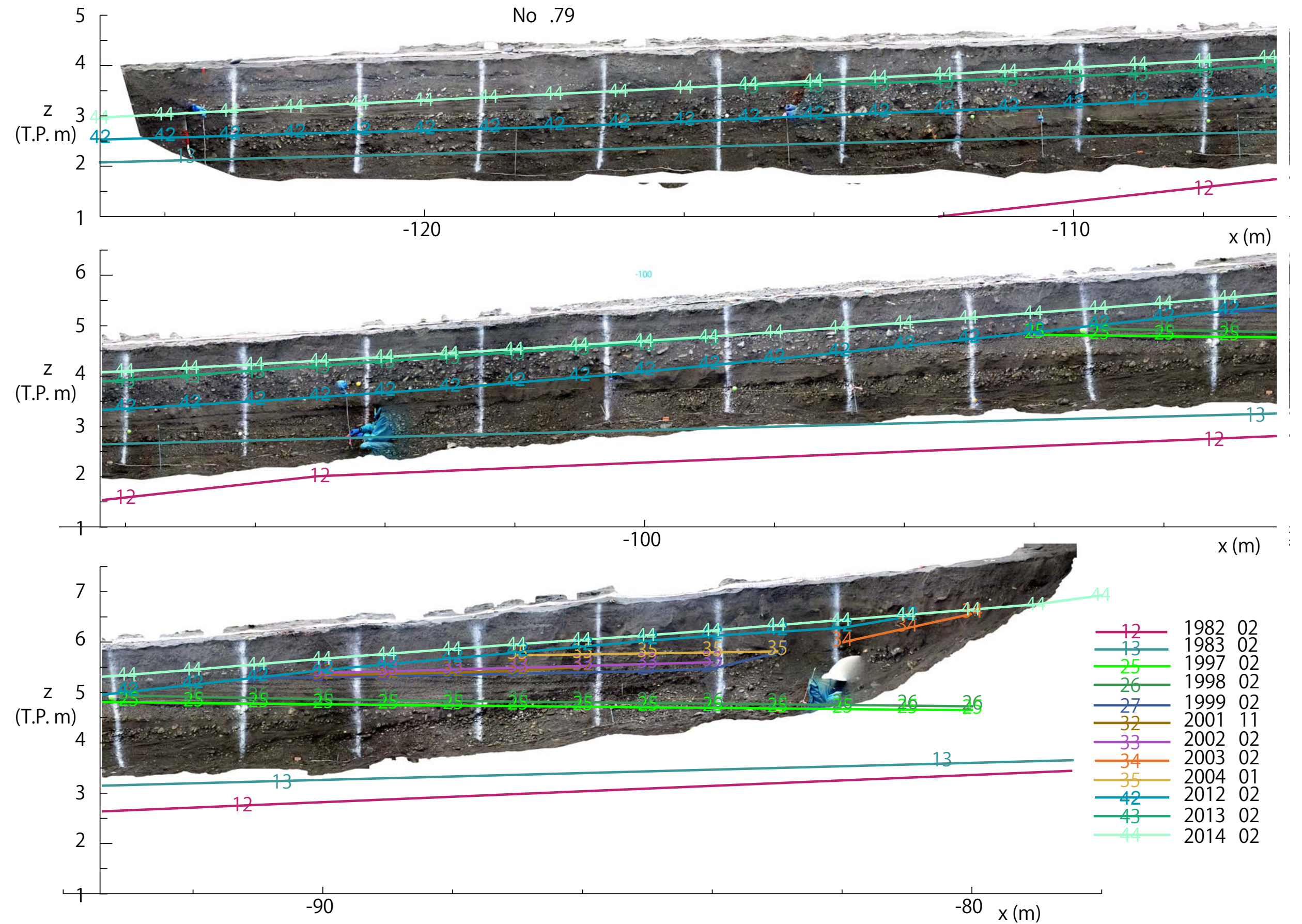


図-2.3.12a 堆積層露出面のオルソ画像(2015年2月5日)と現存する海浜面の推定線 (No.79)

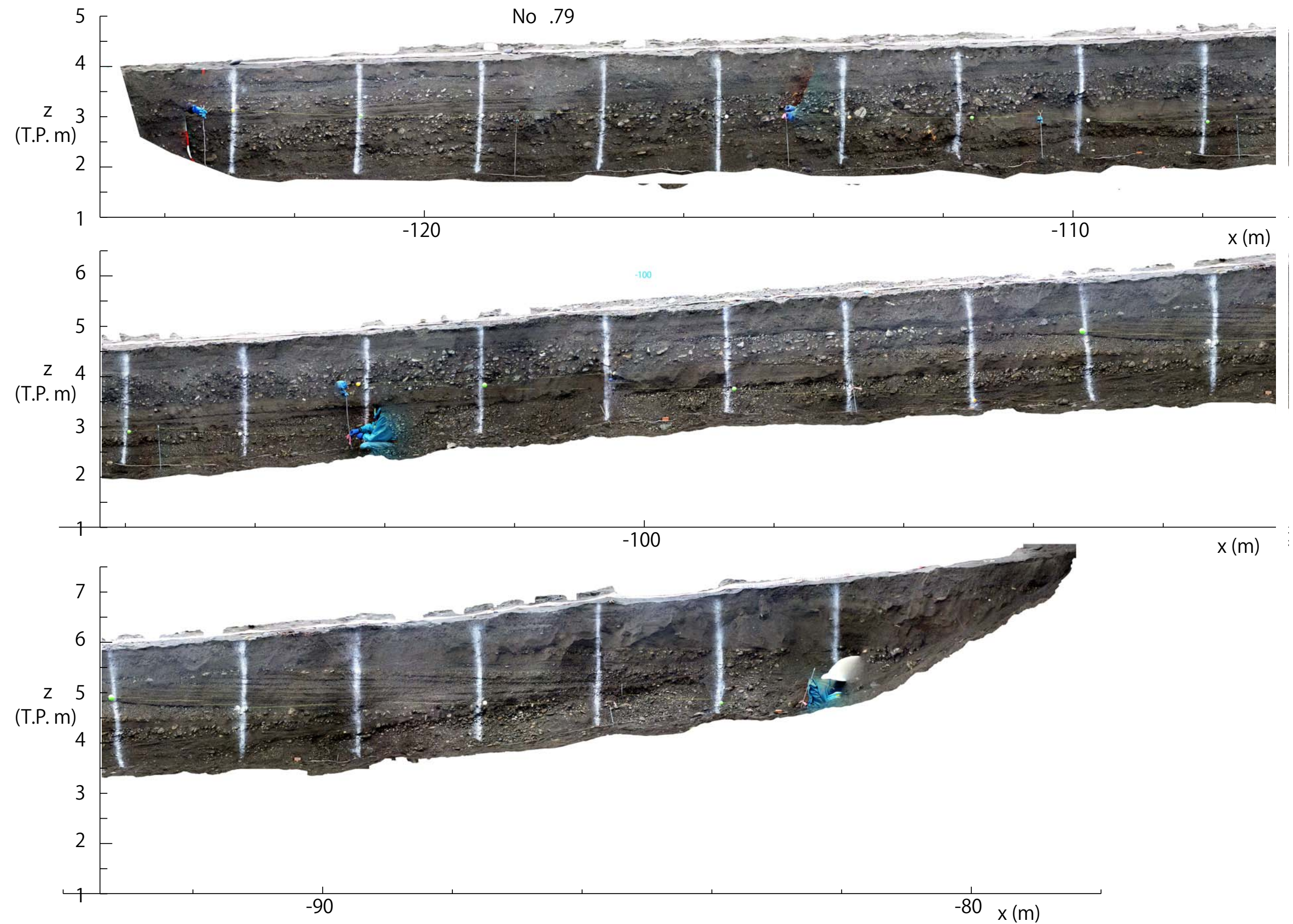


図-2.3.12b 堆積層露出面のオルソ画像(2015年2月5日)(No.79)

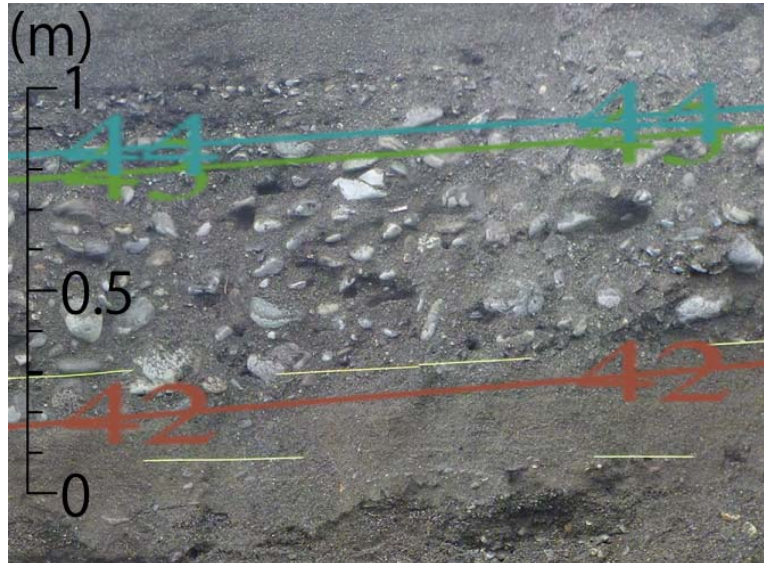


写真-2.3.11 高波浪時のもの見られる部分の拡大
(No.79 x=-102m 付近, 2015 年 2 月 5 日)

2.3.6. 富士海岸のトレンチ調査の考察

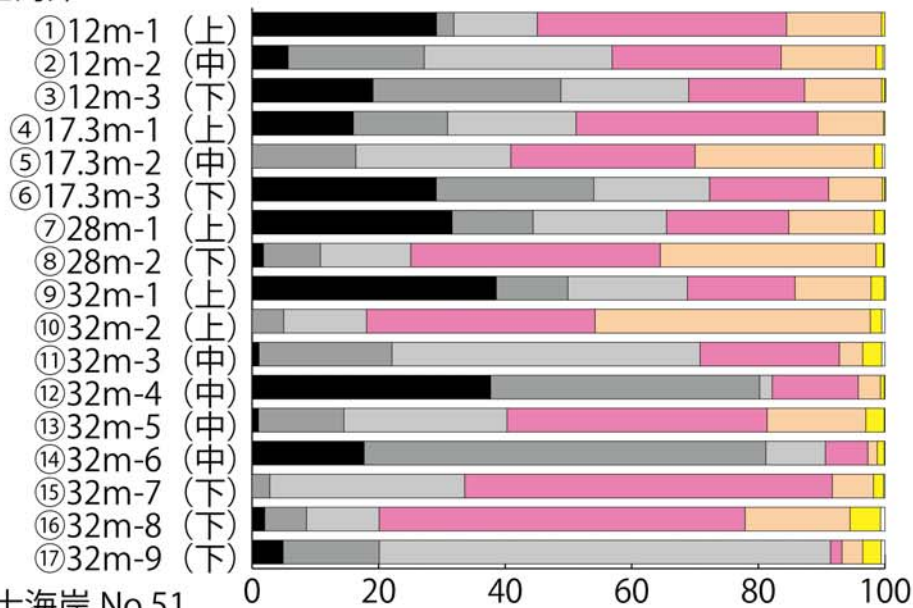
a 礫層の形成と礫の形状

図-2.3.13 にオルソ写真から抽出した模式図を示す．静岡・清水海岸のものと同じく，粒度分析の結果によるものではなく目視による分類である．図の配置は，沿岸漂砂の下手側を最上段で上手側を最下段としている．各側線の残存する地表面の推定とオルソ画像の重ね合わせ図から，線と層が合致している最も侵食された層の地表面を桃色の線で示した．

層毎の底質を図中に赤矢印と赤字で示した地点でサンプリングをしており，粒度試験結果を組成別に大別したものを図-2.3.14 に示す．最上段の No.43 では，礫で表層が覆われているがそれより下は，全体的に砂が存在している．表層の礫は明らかに養浜材であるが，それより下の砂に混在している礫も桃色の線までは養浜材料と見られた．No.51 は，養浜材料用いていて工事等の製作ヤードとして均しており，岸側の礫のみ層はこのような人為的な影響が残っている可能性がある．富士川河口左岸に位置する No.79 は，砂のみの層が多く見られるとともに，礫のみの層がほとんど見られない．一方で，下層に細礫のみの層が見られることが特徴となっている．

3 つの測線を全体的に見て礫主体の層と砂主体の層の形成過程を考える．黒水玉のハッチが付いている礫が主体の層は層理面で 1 度の形成と見て長いものは少なく，沖側で厚く始まり岸に向かってくさび状に薄くなっている．ハッチのない砂主体の層は，層理面が判断しにくい岸沖方向に向かい比較的同じ厚さで長く続いている．初めに礫はバームを形成し易く汀線側に厚く堆積し，次に高波浪がバームを崩して礫を岸側へ選択的に拡散させることを，石川ら（2010）が類推している．この考え方に加えて，礫の形状による礫の移動も軽視できない．

富士海岸 No.43



富士海岸 No.51



富士海岸 No.79

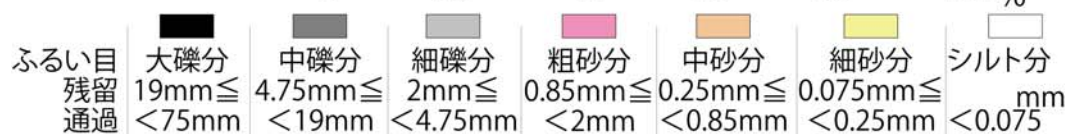
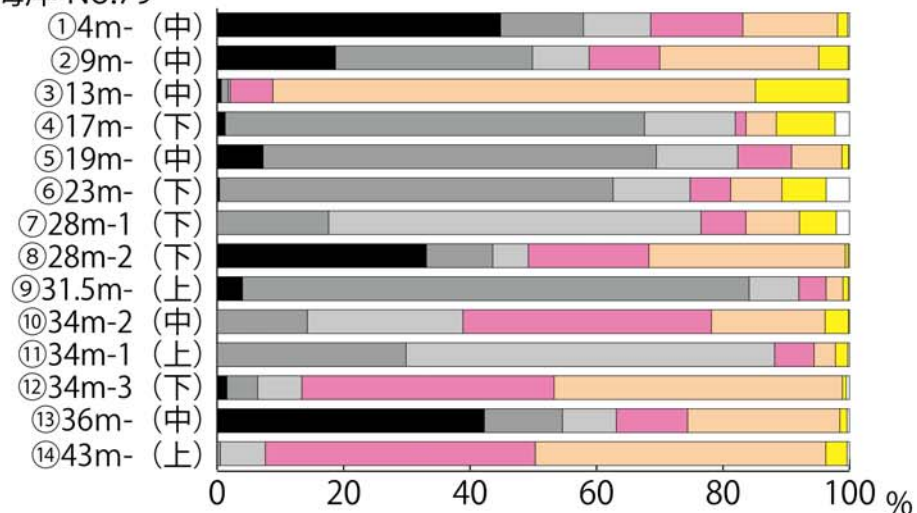


図-2.3.14 富士海岸の堆積層の粒度組成

海岸の礫の多くは扁平状となっており、写真-2.3.12 および写真-2.3.13 に見られるように礫により特徴付けられる堆積構造がある。写真-2.3.12 は、礫の層の厚さがある段階で扁平の礫が重畳している状態である。写真-2.3.13 では、層の中で岸側となると遡上できる礫が少なくなるが、礫の形状により揚力が生じやすい遡上波中を滑走可能な扁平形状のものの点在が見られる。特に、形状が扁平なものほど陸側に点在している。

細礫のものの場合には、砂主体の層に近い堆積構造となっている。これらの違いは、礫と砂の粒径や形状の違いから粒子個体が受ける力や作用の仕方の差異によるところが大きいと考えられる。

次に、砂と礫が混合している場合の挙動を考える。写真-2.3.14 から写真-2.3.16 は、No.51 で同一の砂に礫混じりの層の混合状態を岸向きに追いかけたものである。海側の写真-2.3.14 の段階では、礫の向きに指向性がなく礫の長手方向が様々な方向に向いている。写真-2.3.15 では、礫の長手方向が右上がりの方向に指向性を持ち始めるとともに、指向性に従いやすい扁平なものが選択され始めて球の礫が少なくなっている。写真-2.3.16 では扁平な礫が多くなり遡上波中を滑走していることが伺える。

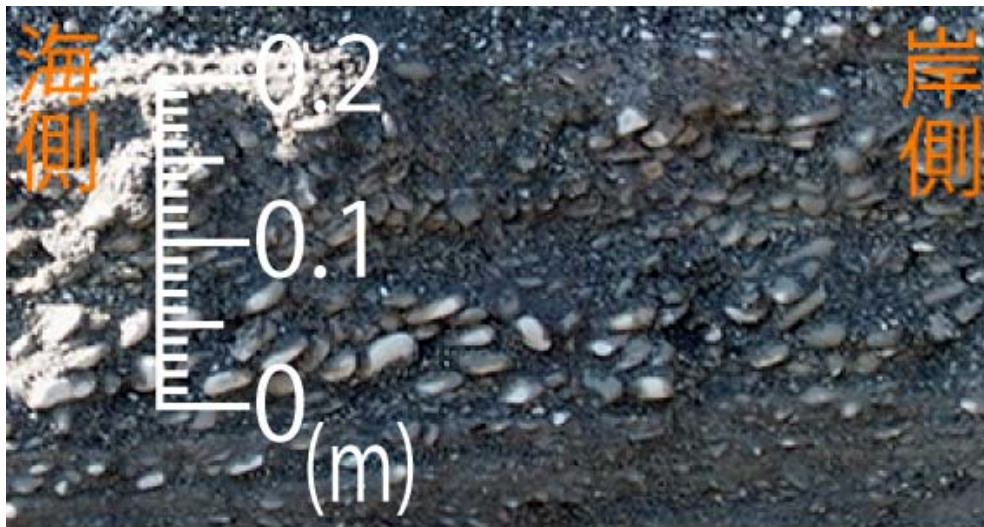


写真-2.3.12 扁平な礫の重畳状態(No.43, 2015 年 2 月 5 日)

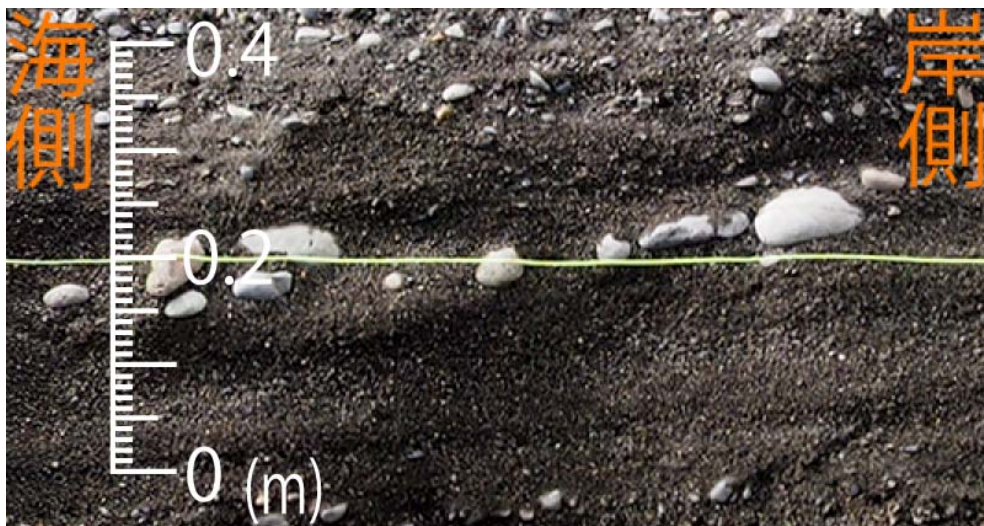


写真-2.3.13 扁平な礫の飛び石状態(No.51, 2015 年 2 月 5 日)



写真-2.3.14 無指向な混合状態(No.43,x=81m,z=3.0m, 2015 年 2 月 5 日)



写真-2.3.15 指向性の選択段階(No.43,x=74m,z=3.5m, 2015 年 2 月 5 日)



写真-2.3.16 全体が指向性を有する状態(No.43,x=69m,z=4m, 2015 年 2 月 5 日)

b 堆積層の年代測定

檜新田地先 No.51 の堆積層より木質系の埋没物を採取することができた。発見された位置を図-2.3.13 に示した。試料 1（木片）（写真-2.3.14）は T.P.3.5m で、試料 2（根っこ）は T.P.約 4.2m であった。これらの資料から堆積層の年代が推定できれば、新しい年代であれば堆積機構の解明に役立ち、古い年代であれば生じた海岸侵食の規模が大局的な地形形成過程で得られた蓄積をどの程度損失しているかの侵食の進行度を把握できる。

得られた試料について放射性炭素年代測定（以下、 ^{14}C 年代測定）を行った。測定は、(株) 加速器分析研究所へ依頼した。試料 1（木片）の分析結果を図-2.3.15 に示す。図で縦軸は放射性炭素年代を示し、横軸は暦年代を示している。図中左側軸の赤色の分布は、試料のから得られた ^{14}C の量から推定した放射性炭素年代を確率分布により示したものである。青い幅を持った線は、最新の世界標準の校正曲線である IntCal13 である。試料の放射性炭素年代と校正曲線の交点から暦年代を求める。こうして得られた年代は、西暦であるが推定値であることを示すため calAD と表示する。

その結果、試料 1（木片）は 1320calAD～1432 calAD の範囲、試料 2（根っこ）は Modern（1950 年以降）という結果が得られた。根や動物と異なり木片が自ら層内へ侵入することは不可能なので木片より古い時代から採取されることはなく、この層は少なくとも 1320 年以降に堆積したと言える。松原（1992）は、この砂丘地と山地の間にある浮間ヶ原の遺跡の年代推定の研究において、現在の富士海岸背後の海岸砂丘が 2000～3000 年前に形成されたバリア地形であると推定している。したがって、堆積の年代としては整合が取れる。

しかし、海岸においては、海岸域で発生した植物だけでなく、河川から洪水時に排出された漂着物が多く存在する。その中には、山中で発生した古い植物であることも想定される。この層が 1320 年以降のものであることは示されるが、それ以降のいつであるかは推定できない。より詳しい推定は多くのサンプルを必要とするが、海岸域でより多くのサンプルを得ることは不可能である。したがって、冒頭で示した年代測定の目的である堆積機構の解明も侵食の進行度も達成できない。よって、海岸侵食対策のための調査は近年 100 年程度の堆積を追求する調査となるので、 ^{14}C 年代測定の利用性は低い。

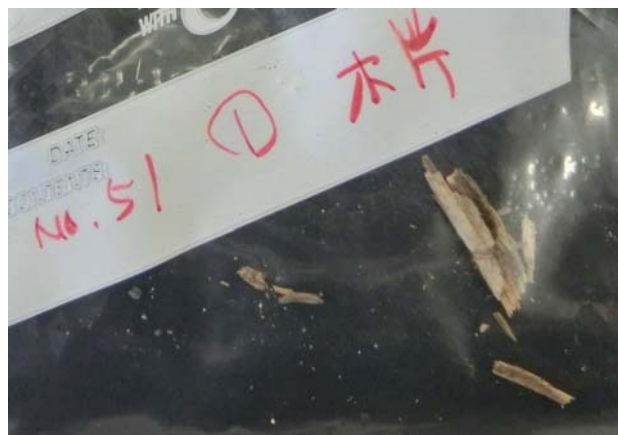


写真-2.3.14 トレンチから得られた年代推定用試料の例（木片）

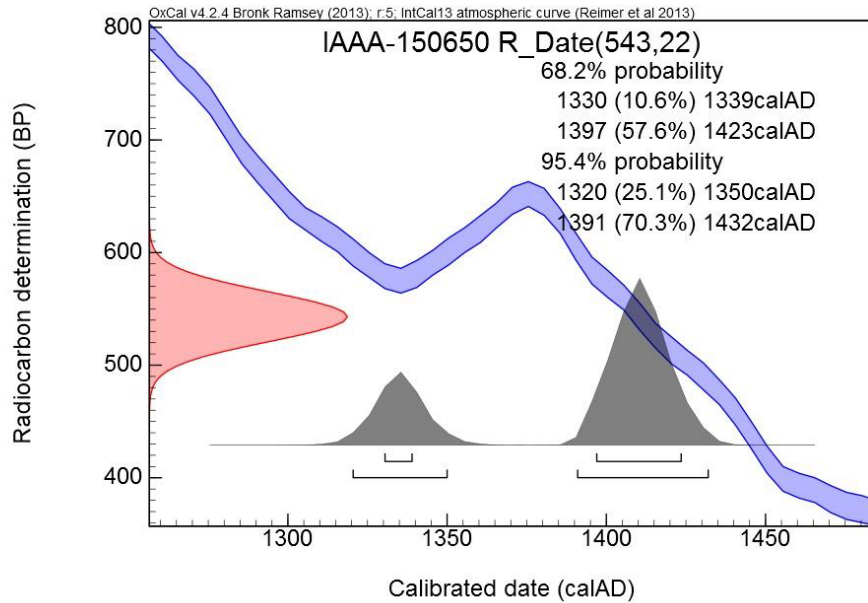


図-2.3.15 試料 1 の校正情報（縦軸： ^{14}C 年代，横軸：暦校正）

c 砂の堆積と層厚

富士海岸が礫海岸と言われるものの，堆積層の模式図の図-2.3.13 と粒度分析結果の図-2.3.14 を合わせ見れば，元来は砂が多い海岸であることがわかる．また，東柏原新田の礫養浜開始後や檜新田，さらに 2.2 節で示した清水海岸の駒越南町の堆積層を見ると砂の供給が十分でないと堆積層が薄くなり海浜全体の高さも低くなることがわかる．このように，砂成分は堆積過程において安定的な海浜形成とその持続的な維持のために重要な役割を果たしていると考えられる．

また，このように大量な礫養浜を実施した場合や礫に対して砂成分が少ない海岸では，礫成分によって生じる前面が急勾配で比高が高いバームが生じる．バームは底質の分級効果の結果でもあるので砂が混在することはないが，その場合にはバーム背後への砂の堆積も生じなくなる．これについては，2.4.6.c 節で議論する．

2.3.7. 富士海岸のまとめ

富士川からの供給土砂は粒径がバリエーションに富んでおり，海浜材料を供給してきた．このため，富士川から東側には礫海岸に分類されながらも砂成分が豊富に存在していた．富士海岸は，河口付近では礫成分も砂成分も十分に供給されている．このように礫によって特徴付けられている海岸で，礫養浜の下手側，消波堤に挟まれた開口部，富士川河口左岸側の 3 点でトレンチ掘削調査を行い，堆積層からサンプルを採取し粒度の構成と発見された木質系試料を ^{14}C 測定し年代を調べた．主な結論を以下に示す．

- 1) 球形に近い小砂利のみで形成される層は崩れやすい．
- 2) 礫の堆積状態は礫の長軸方向が概ね揃っており指向性を有している．

- 3) 礫の堆積構造に見られる指向性は、波の遡上時の水の流れを示していると推察される。
- 4) 下層の古い堆積層は、色も粒度構成から明瞭に判別できた。
- 5) 古い堆積層から得られた木片の年代から、1320 年以降に堆積した層であることが示された。
- 6) 堆積層で砂の中に存在する礫の状態を観察することで、図-2.1.3 に示した堆積状態に分類することができた。

参考文献

- 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.
- 國村一郎・丹羽秀一・熊切良行・宇多高明・三波俊郎・石川仁憲（2014）：富士川河口部における洪水時の土砂動態，土木学会論文集 B2（海岸工学），第 70 巻，pp.686-690.
- 松原彰子（1992）：静岡県浮島ヶ原・雌鹿塚遺跡における自然環境と人間活動の変遷，第四紀研究，第 31 巻(4)，pp.221-227.

2.4. 浜松篠原海岸におけるトレンチ調査

2.4.1. 浜松篠原海岸の概要

浜松篠原海岸は、静岡県浜松市にあり中田島砂丘を背後に有する海岸である（図-2.4.1）。浜松篠原海岸は、天竜川を漂砂源とする河口西側（右岸側）の漂砂系に属し、河口の西側に設置された 22 基の離岸堤群と消波堤を越えた馬込川河口右岸に位置する。当海岸での海岸侵食状況や侵食対策として行なわれている粗粒材養浜の効果については、宇多ら(2014)により報告されている。また、砂丘を含めたダイナミックな漂砂環境については佐藤(2008)により報告されている。また、天竜川河口左岸側（東側）の竜洋海岸の沖合 2 km 水深 40 m に海象観測施設が設置してある。

当海岸では、侵食対策として離岸堤 3 基の建設と養浜が行われてきた。養浜は 2005 年から実施されており、養浜に用いられた材料は、天竜川下流域の河道掘削土砂が用いられ、図-2.4.2 に示す粒度組成となっている。礫と砂が半ずつで養浜材料が構成されている。経年の養浜量についても、静岡県が整



図-2.4.1 浜松篠原海岸における養浜箇所，離岸堤，トレンチ調査測線

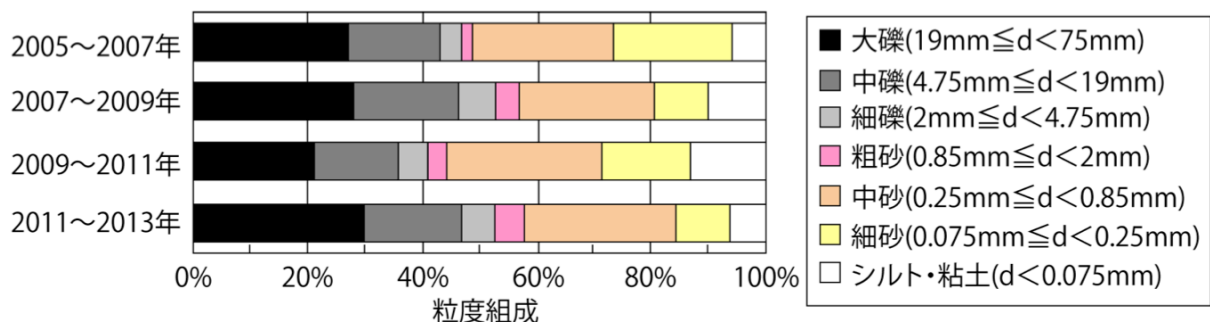


図-2.4.2 投入された養浜材料の粒度組成（静岡県，2014）

理しており、図-2.4.3 のように毎年度 5 万から 20 万 m^3 で 2013 年までに 80 万 m^3 の養浜が実施されている。その効果が海浜堆積として示されていて、養浜量に同調して増加している。

また、養浜の効果を高めるために 3 基の離岸堤が設置された（図-2.4.4 参照）。まず、3 基のうちの中央に位置する 2 号離岸堤が 2007 年に設置された。離岸堤の設置に伴い、西側への礫材の供給は減少した一方で上手側では堆積が生じた。2008 年には No.163 の上手側に 1 号離岸堤が完成した。このため、1, 2 号離岸堤の間に堆積した礫はこの間にほぼとどまることになった。最後の 3 号離岸堤は、2011 年に完成し、これ以降 No.165-1 側への礫の流出は大きく制約されたと考えられる。また、これらの離岸堤と養浜と合わせた効果により 2011 年から 4 年間の汀線変化（図-2.4.4）のように、沿岸漂砂量を徐々に緩和し、下手側へと滑らかに続く汀線を形成させている。

これら 3 基の離岸堤の全景を養浜盛土の上から撮影したのが、写真-2.4.1 である。養浜材料から分級された礫分が、汀線を縁取るように 1 号離岸堤に向かい連なっている様子が見られる。

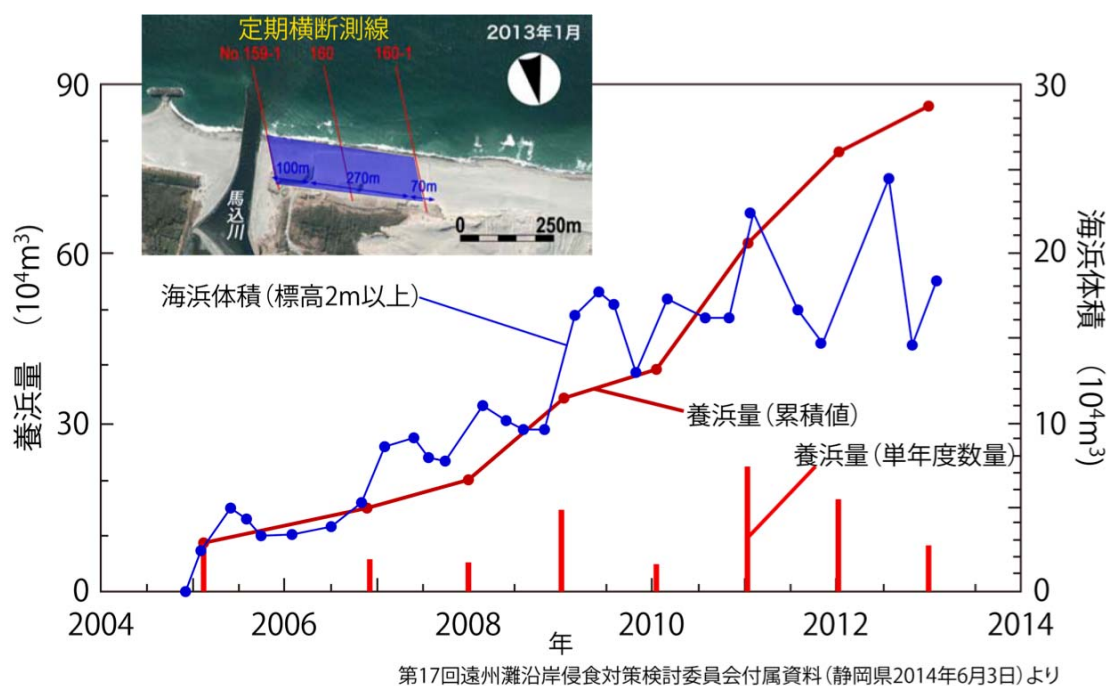


図-2.4.3 盛土された養浜量の推移（静岡県，2014）

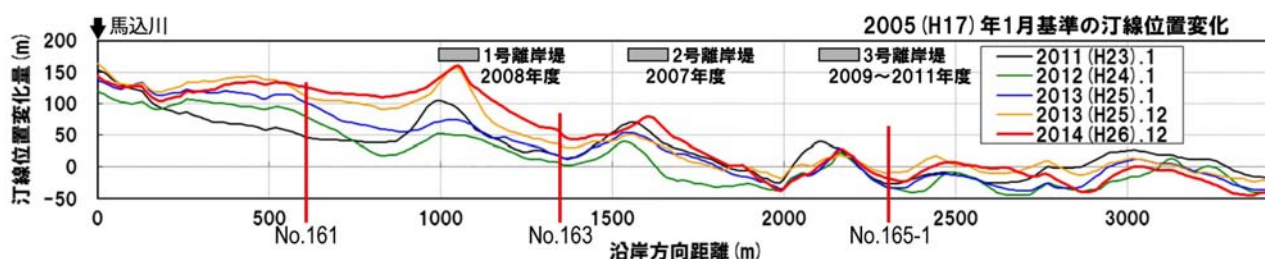


図-2.4.4 離岸堤完成後の汀線変化とトレンチ調査測線（静岡県，2015）



写真-2.4.1 養浜盛土上から漂砂下手側を見た状況
手前から 1 号離岸堤, 2 号離岸堤, 3 号離岸堤 (2015 年 10 月 30 日)

2.4.2. 測線の選定

トレンチ掘削を行った測線は、砂礫の投入箇所近く離岸堤による影響が少ないと考えられる測線 No.161, 1 号離岸堤が完成するまでは養浜材が到達していたと考えられる測線 No.163, 養浜材料が到達する以前に 2 号離岸堤が完成し養浜材が到達していないと想定される測線 No.165-1 の 3 測線とした (図-2.4.1 および図-2.4.4 参照). よって, No.161 は堆積過程にある測線, No.165-1 は侵食過程にある測線となる. また, No.165-1 は, 近年の堆積過程を確認できないものの, 粗粒材養浜の土砂が漂着する以前の海岸状況を調べることができる.

トレンチの掘削測線を定期横断測量の測線と一致させることにより長期的な地形変化調査との整合性を図った.

2.4.3. 礫養浜投入箇所の手側に位置する No.161

a トレンチ掘削位置の海浜状況 (No.161)

浜松篠原海岸では, 定期海岸地形測量が 1974 年から実施されており, 特に近年では年に 4 回の高頻度で測定されている. 測線 No.161 について T.P.0 の岸沖位置を汀線位置として経年変化を図-2.4.5 に示す. この測線は図-2.4.1 に示したように養浜箇所の西側で卓越沿岸漂砂の下手となる. 汀線位置の後退は, No.161 では 2007 年 10 月まで 4.4m/年の割合となっている. 一方で, 2007 年の養浜開始以降に回復に向かう状況がわかる. 2012 年までの回復が速いことは, 養浜投入の効果だけでなく離岸堤を早期の 2017 年から設置したことによる効果によると考えられる.

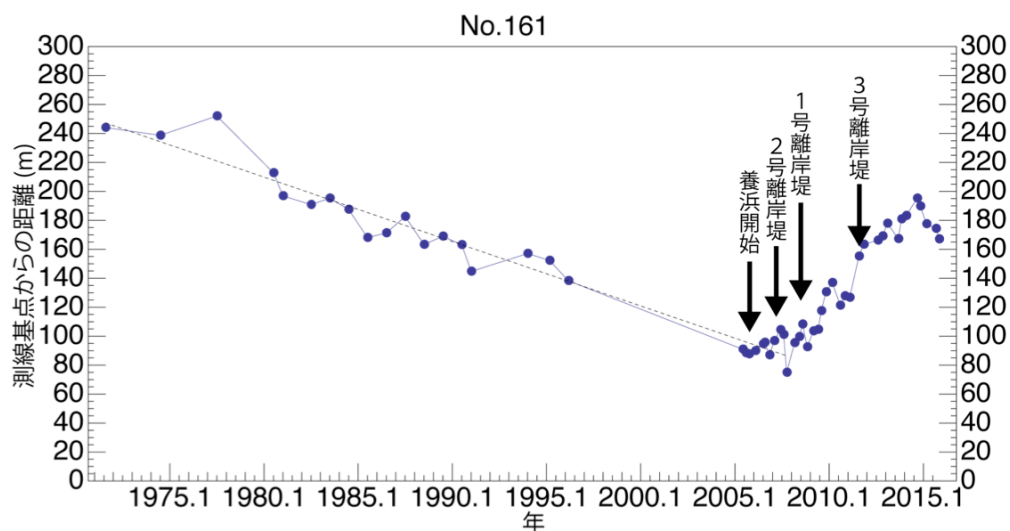


図-2.4.5 汀線位置の経年変化 (No.161)

No.161 のトレンチ掘削は、2015 年 11 月 17 日に実施した。海浜とトレンチの状況を写真-2.4.2 に示す。掘削土の山やトレンチの様子から主に砂であることが読み取れるが、海側からの写真-2.4.3 ではトレンチより海側の表面は礫で覆われている様子が見られる。これは、養浜材に含まれる礫分が覆っているものである。トレンチの全景を写真-2.4.4 に示す。陸側のトレンチの掘削面も砂が主体である様子が見られる。



写真-2.4.2 No.161 の海浜とトレンチの状況 (2015 年 11 月 17 日)



写真-2.4.3 汀線側からトレンチを挟み中田島砂丘側の様子 (No.161)
(2015 年 11 月 17 日)



写真-2.4.4 トレンチ全景 (No.161) (2015 年 11 月 17 日)

b 定期海岸断面測量から得られる露出面の縞模様の推定 (No.161)

2.1.2.a 節で示した方法による露出面に残存する地表面による縞模様を推定した結果を図-2.4.6 に示す。

堆積が進んでいる No.161 の断面には、過去の多くの時期の地表面が残っている。2011 年 2 月から堆積が進んでいたが、線番号 51 の 2014 年 9 月に古い地表面を切断していることから大規模な侵食が生じていたことがわかる。しかし、その後わずか 2 ヶ月の間に線番号 52 まで大きく堆積した。

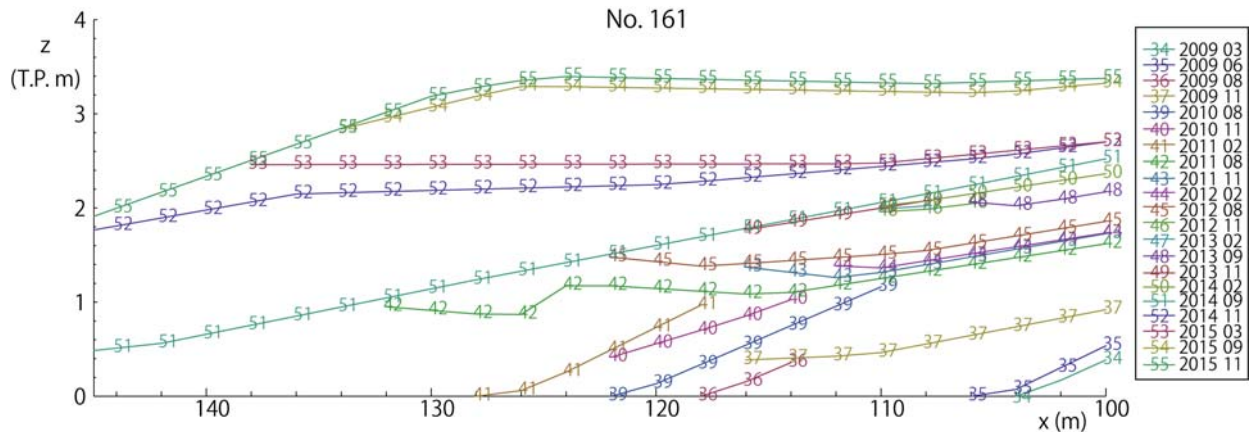


図-2.4.6 断面模様の推定結果(No.161)

c 露出面の解析 (No.161)

トレンチの堆積層の露出面を撮影した写真から合成されたオルソ写真を図-2.4.7a (現存する地表面の推定線有り) および図-2.4.7b (現存する地表面の推定線無し) に示す。4 つに切断して示してある。定期測量の測線とトレンチ掘削を一致させたことで、現存する地表面 (縞模様の推定) と高い確度で一致している。

定期測量の間にも礫が存在する明瞭な層理面が存在しており、この間に比較的大きな外力によって堆積が生じた可能性があることがわかる。特に、線番号 51 (2014 年 9 月) と線番号 52 (2014 年 11 月) の間には、いくつかの堆積層が見られる。この間に生じた外力と堆積層形成の関係については、2.4.6 節で議論する。

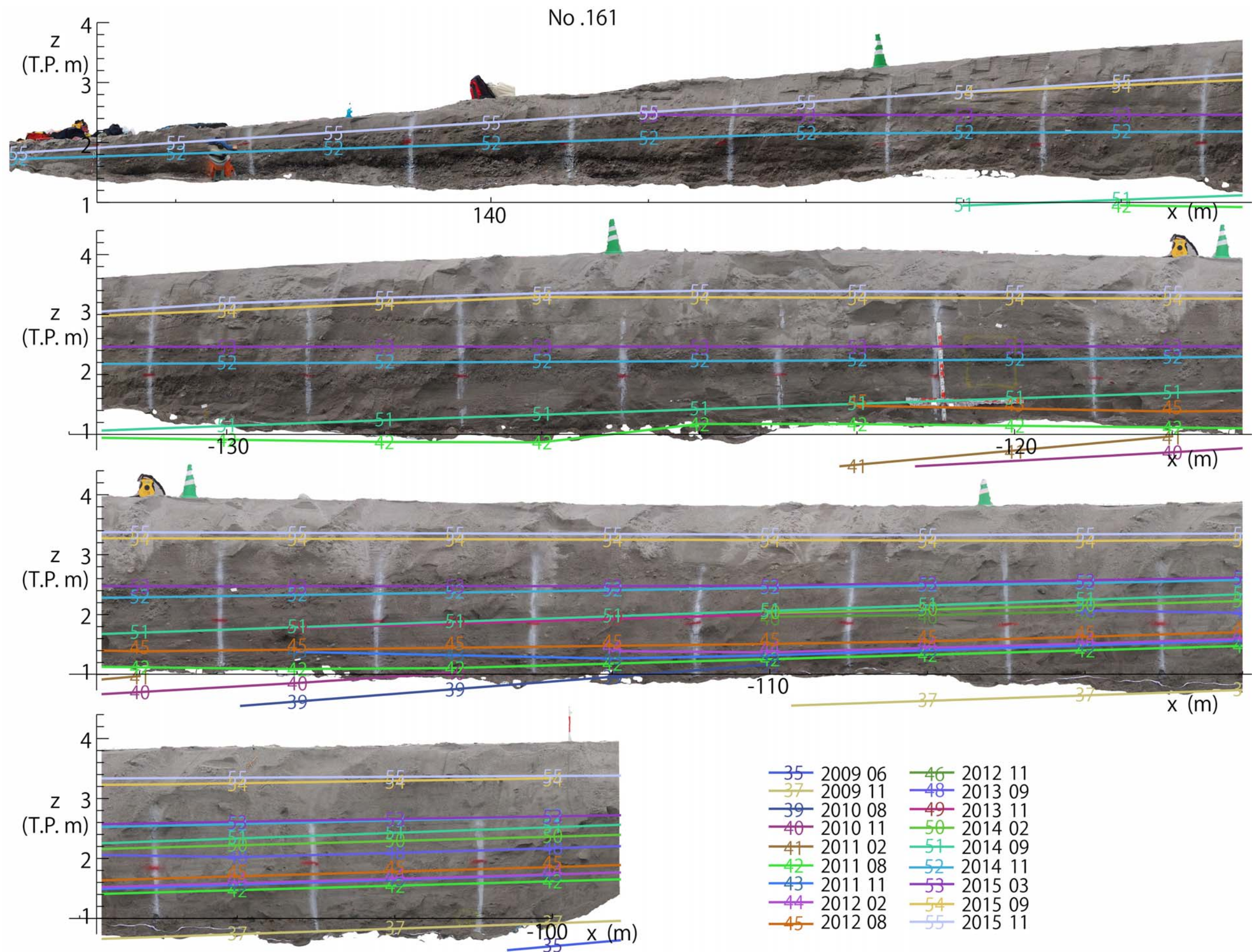


図-2.4.7a 堆積層露出面のオルソ画像と現存する海浜面の推定線 (No.161)

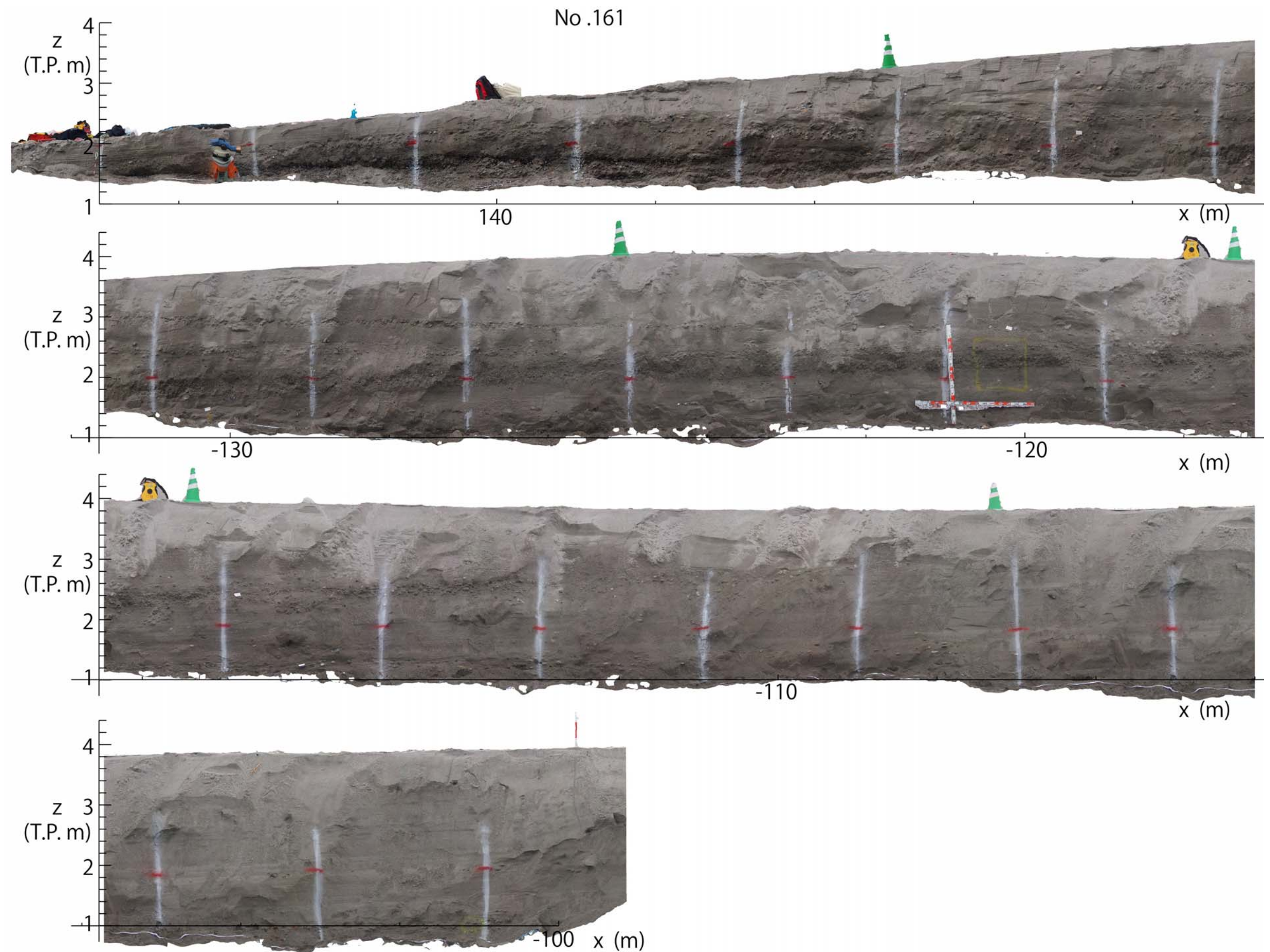


図-2.4.7b 堆積層露出面のオルソ画像 (No.161)

2.4.4. 養浜開始後に離岸堤が設置された No.163

a トレンチ掘削位置の海浜状況 (No.163)

No.161 と同様に T.P.0 の岸沖位置を汀線位置として経年変化を図-2.4.8 に示す. 2006 年 7 月まで 4.4m/年の割合で後退していた. No.163 は図-2.4.4 に示したように 2007 年に下手側の 2 号離岸堤が設置され, 翌 2008 年に上手側の 1 号離岸堤が設置された. 離岸堤整備後には, 侵食もしくは堆積の傾向が見られず安定している. 2015 年に大幅な前進が見られる. これは, 図-2.4.9 に見られるように, 2014 年から 2015 年にかけて馬込川～1 号離岸堤間と 1 号離岸堤～2 号離岸堤間の海岸線の西寄りの傾きから西向きの大規模な沿岸漂砂を補足して前進したものと分かる. 一方で, 東側からの供給が見込めない No.161 では後退が生じている.

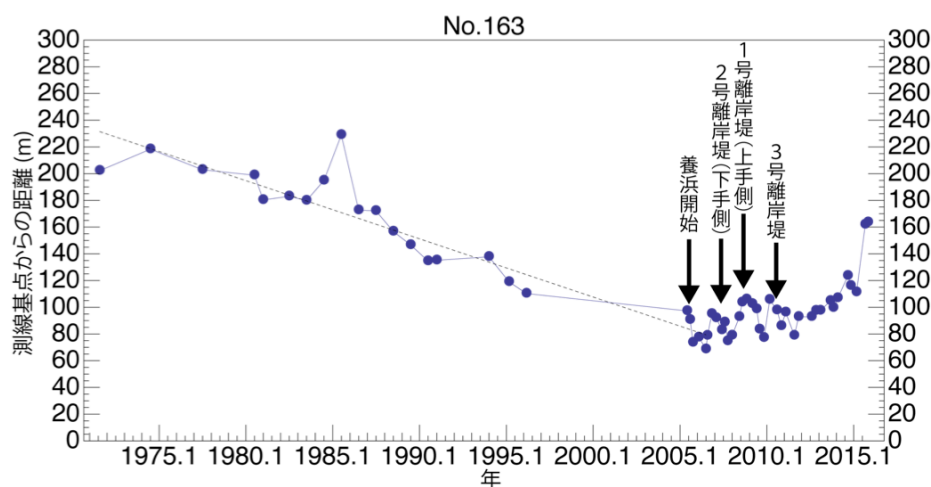


図-2.4.8 汀線位置の経年変化 (No.163)



図-2.4.9 2014 年から 2015 年の海岸線の変化

No.163 付近の状況を写真-2.4.5 に示す．ポールがトレンチを掘削した測線である．前方に見える離岸堤は 1 号離岸堤である．写真-2.4.6 には，トレンチ掘削位置付近から 2 号離岸堤側を望んだものである．礫によるバームとビーチカスプの形成が確認できる．また，写真-2.4.7 に 1 号離岸堤背後の状況を示す．左手（東側）に大量の礫が堆積しているのがわかる．1 号離岸堤と 2 号離岸堤の間は 1 号離岸堤の東側よりも礫の量が少なく，1 号離岸堤により礫の流入が制限されていると考えられる．



写真-2.4.5 No.163 の海岸状況（2015 年 11 月 18 日）



写真-2.4.6 2 号離岸堤の東側の海岸状況（2015 年 10 月 30 日）



写真-2.4.7 1号離岸堤の背後（2015年10月30日）

写真-2.4.8 は、無人航空機（DJI 社 Phantom4）で2号離岸堤から1号離岸堤に向かい撮影したものである。2本の黒く帯状に汀線と平行に見られるのが、礫の堆積である。写真手前の2号離岸堤の背後にまとまった黒い範囲があるものの、そこから沿岸漂砂下手側での礫の存在はまばらであることが確認できる。



写真-2.4.8 2号離岸堤から東側の礫の堆砂状況（2017年3月31日）

b 定期海岸断面測量から得られる露出面の縞模様の推定 (No.163)

2.1.2.a 節で示した方法による露出面の縞模様を推定した結果を図-2.4.10 に示す。前述のように、2014 年から 2015 年にかけて大量の堆積が生じていた。このために、海側に見られる残存する地表面の本数が 2 時期しかなく陸側に多く見られる結果となった。

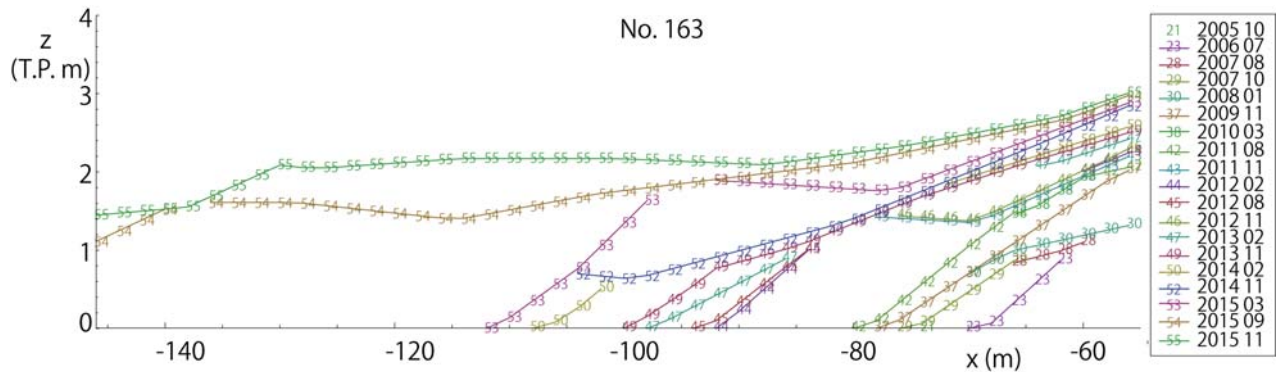


図-2.4.10 断面模様の推定結果(No.163)

c 露出面の解析 (No.163)

トレンチの堆積層の露出面を撮影した写真から合成されたオルソ写真を図-2.4.11-1a および -1b, -2a, -2b に示す。この測線は短期間の堆積状況と数年前の堆積層についても観察が必要となったことから、掘削延長が長くなった。このため、海側の図-2.4.11-1a（現存する地表面の推定線有り）および図-2.4.11-1b（現存する地表面の推定線無し）と岸側の図-2.4.11-2a（現存する地表面の推定線有り）および図-2.4.11-2b（現存する地表面の推定線無し）に分けてさらにそれぞれ 4 段と 3 段で示した。

海側については、推定した現存する地表面と露出面に見られる層理面が交差する等一致度が低い。

一方で、陸側については良く一致しており、深い方、つまり古い時期の方が測量結果からの現存する地表面と層理面との一致の確度が高くなっている。

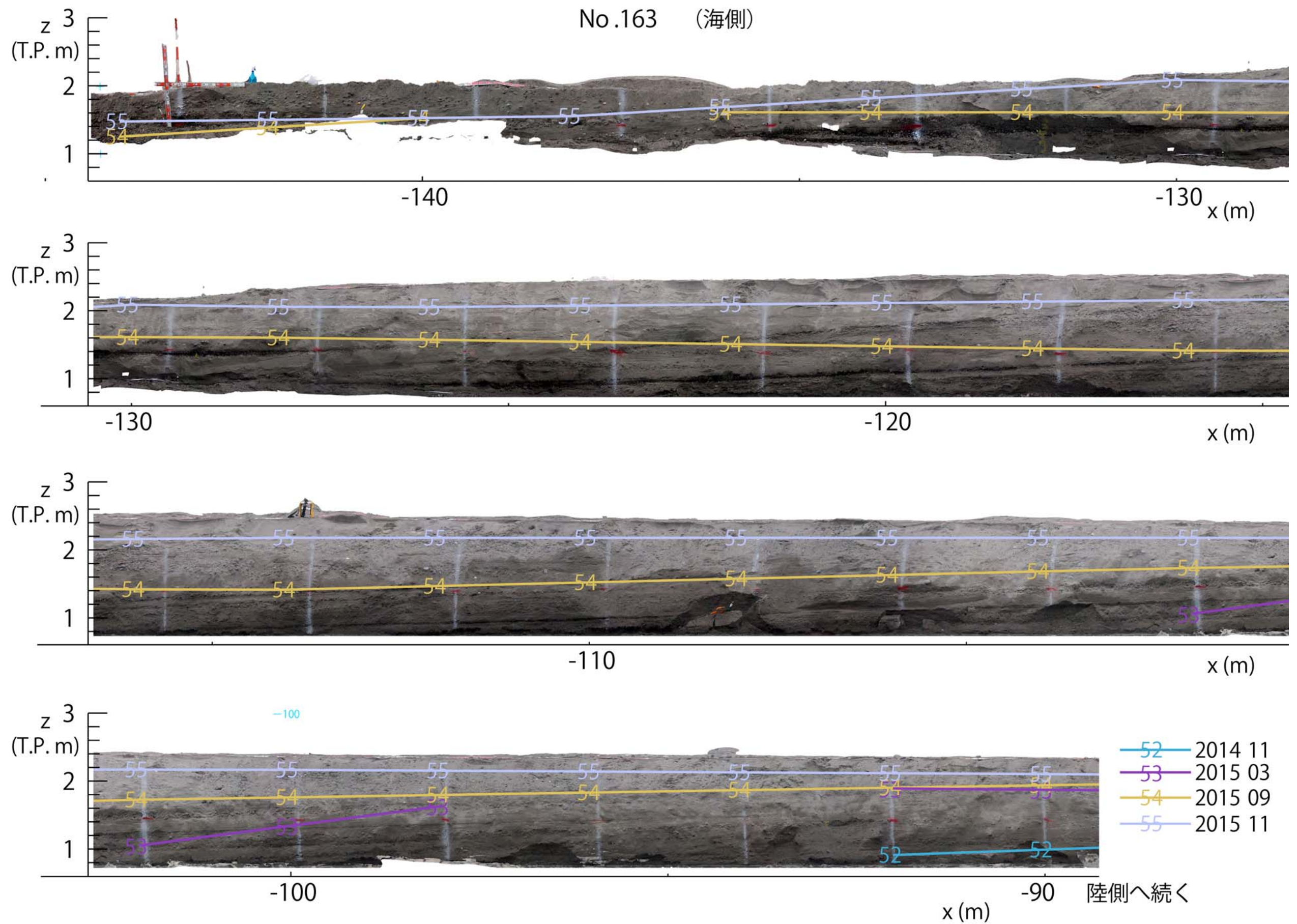


図-2.4.11-1a 堆積層露出面のオルソ画像と現存する海浜面の推定線 (No.163)

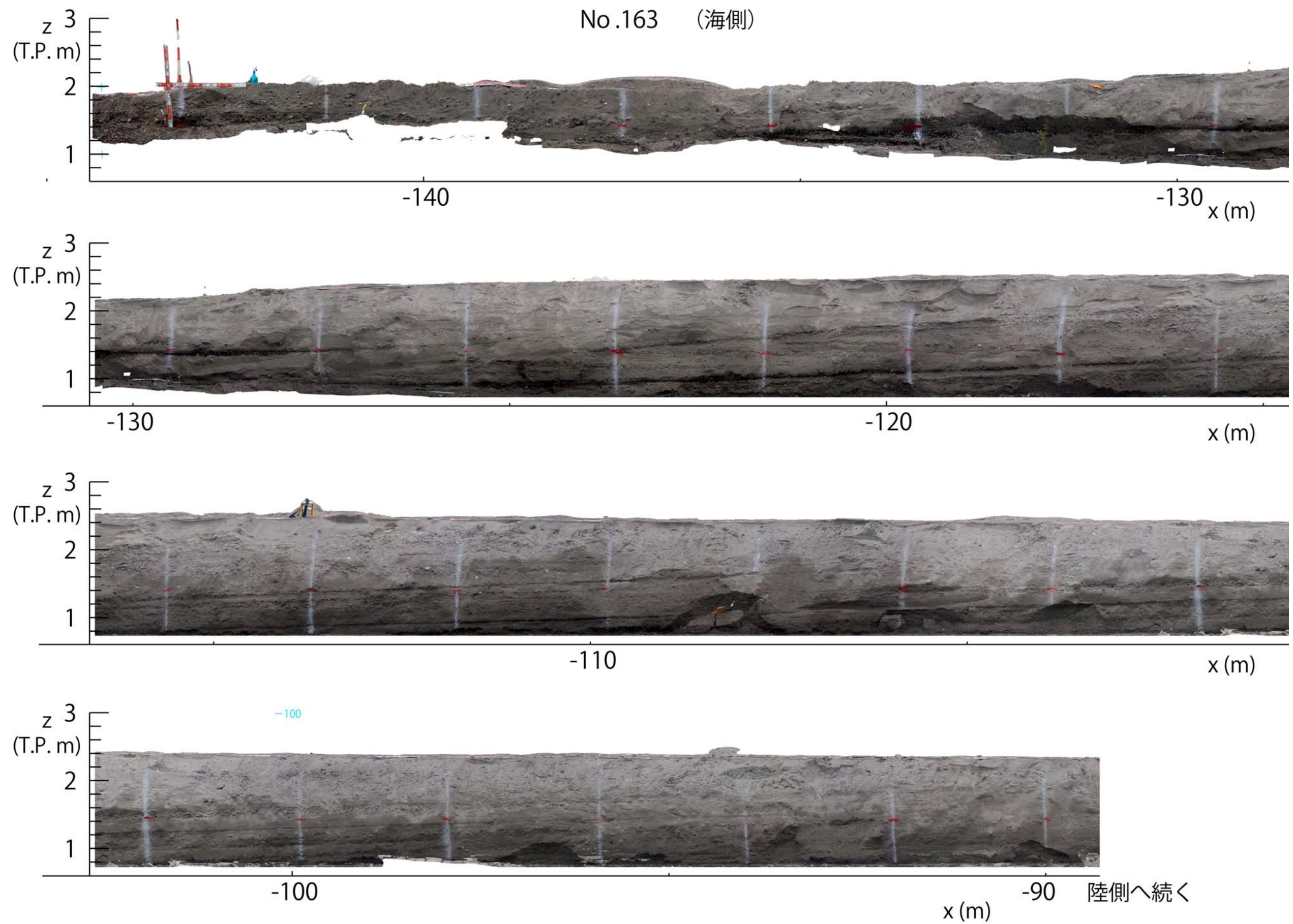


図-2.4.11-1b 堆積層露出面のオルソ画像 (No.163)

No.163 (陸側)

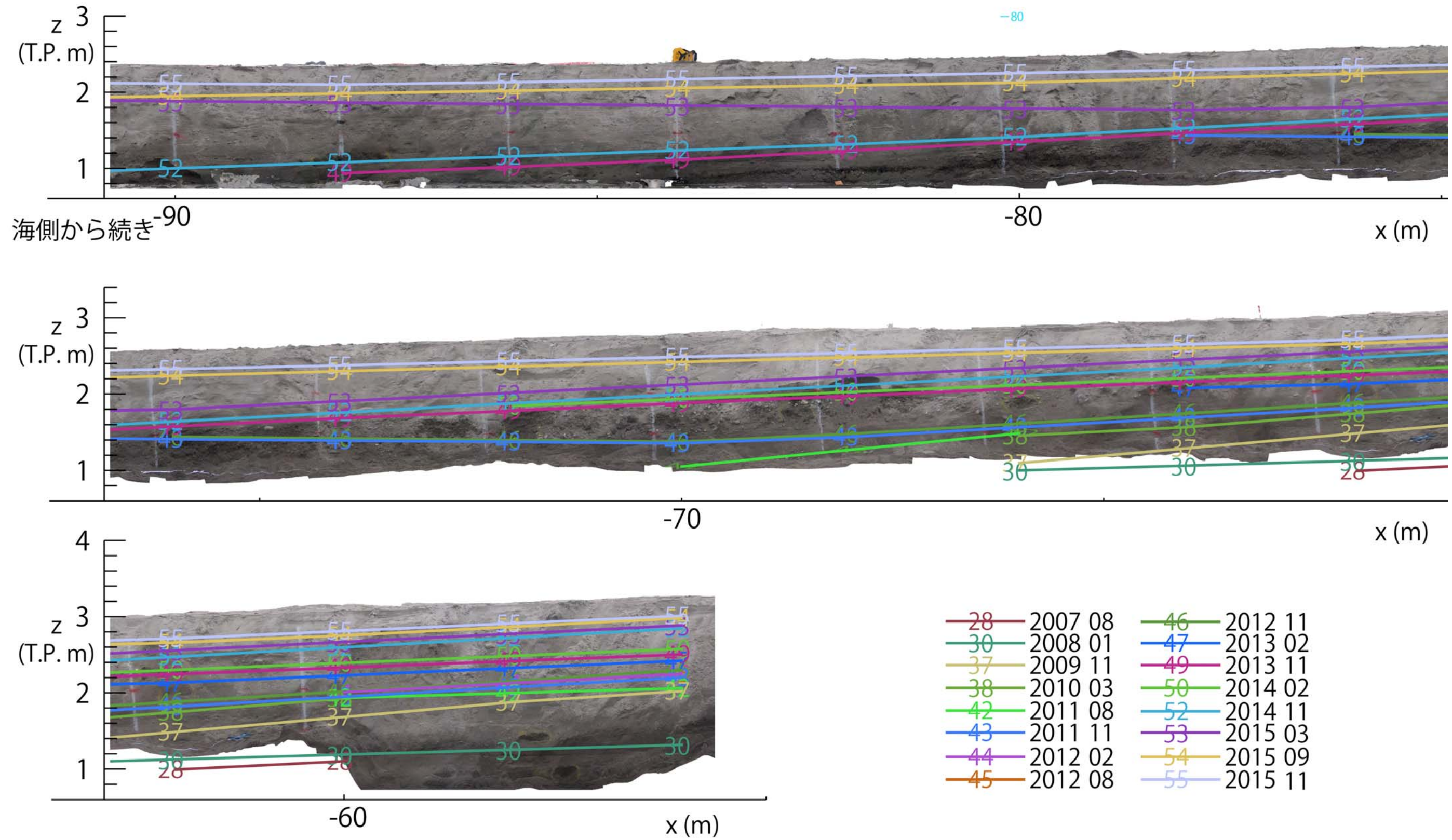


図-2.4.11-2a 堆積層露出面のオルソ画像と現存する海浜面の推定線 (No.163)

No.163 (陸側)

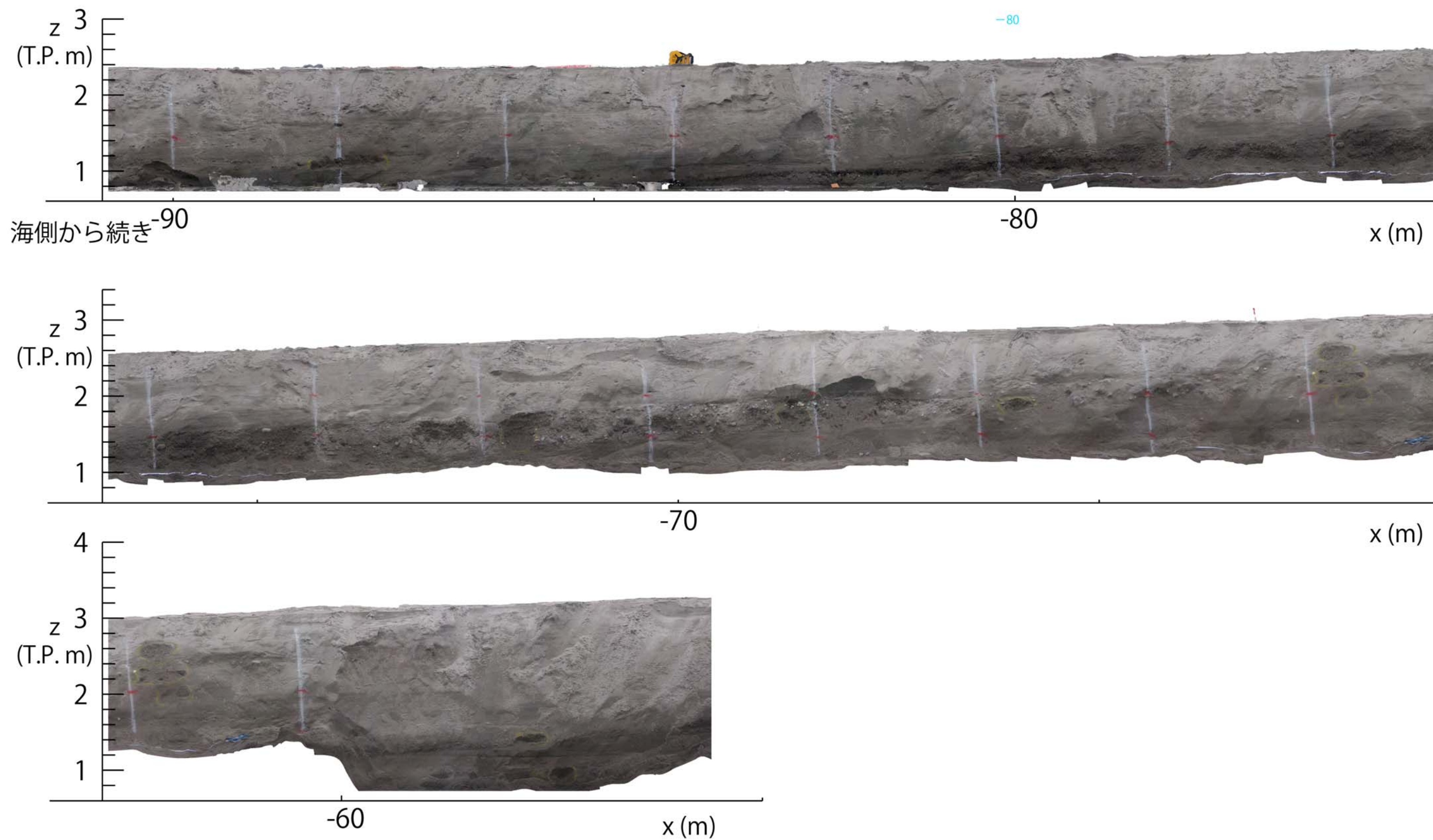


図-2.4.11-2b 堆積層露出面のオルソ画像 (No.163)

2.4.5. 養浜開始後に離岸堤が設置された No.165-1

a トレンチ掘削位置の海浜状況 (No.165-1)

No.161, No.163 と同様に T.P.0 の岸沖位置を汀線位置として経年変化を図-2.4.12 に示す. No.165-1 では 2005 年 9 月までは 5.1m/年, 2005 年 9 月以降は 4.3m/年の割合で汀線が後退している.

No.165-1 は, 3 基の離岸堤に対して沿岸漂砂の卓越方向の下手に位置しており, 離岸堤を設置することでトンボロ形成に伴う砂の引き寄せや沿岸漂砂の遮断により侵食が懸念される漂砂環境となっている. 図-2.4.12 において, 1997 年から 2005 年までの測量がなされていないものの後退速度を比較すると養浜以降は鈍化しており, 砂を通過させる離岸堤の性能設定の効果が表れていると考えられる.

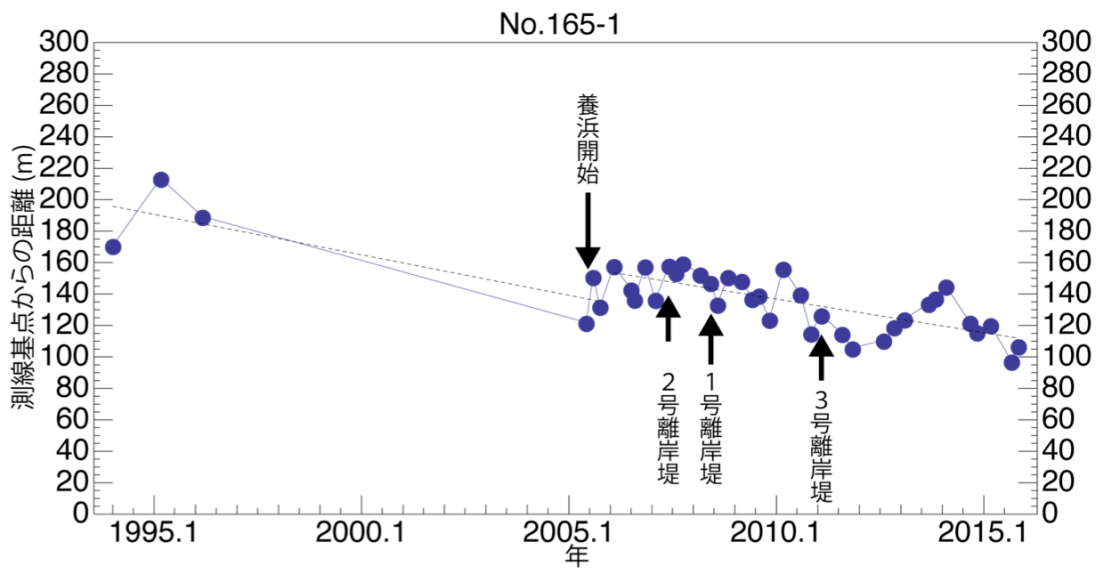


図-2.4.12 基準点から汀線までの距離の経時変化(No.165-1)

写真-2.4.9 に 3 号離岸堤のトンボロから No.165-1 方向に海浜状況を撮影したものを示す. No.161, No.163 と比べて, 汀線付近に礫がほとんど見られない. また, 前述のように改善されたといえ依然と侵食傾向となっている海岸であるにもかかわらず, 写真に写っている車両の乗り入れ跡や足跡から締まりが緩く堆積したばかりと推定される. このことから, 堆積と侵食を大きく繰り返している海岸と考えられる.

写真-2.4.10 にトレンチの掘削方向と離岸堤の関係を示す. 離岸堤の遮蔽効果を受けない程度の位置となっている.



写真-2.4.9 3号離岸堤側から見た No.165-1 の海岸状況（2018 年 11 月 18 日）



写真-2.4.10 No.165-1 のトレンチ掘削の方向と 3 号離岸堤の関係
（2015 年 11 月 18 日）

写真-2.4.11 は、無人航空機（DJI 社 Phantom4）で 3 号離岸堤（一番手前）から 2 号離岸堤に向かい撮影したものである。写真-2.4.8 で見られた黒く帯状の礫の堆積は見られない。3 基の離岸堤により礫が西側へ移動することが制限されていると考えられる。また、この写真から、1 号離岸堤と 2 号離岸堤の間と 2 号離岸堤と 3 号離岸堤の間の海岸線形状が異なり、礫を多く含む 1 号離岸堤と 2 号離岸堤の間は直線的になっていることが分かる。



写真-2.4.11 3 号離岸堤西側 No.165-1 トレンチ掘削地点上空から東側の海浜状況
(2017 年 3 月 31 日)

b 定期海岸断面測量から得られる露出面の縞模様の推定 (No.165-1)

2.1.2.a 節で示した方法による露出面の縞模様を推定した結果を図-2.3.13 に示す。また、2.1.2.a 節の図-2.1.2 で例として示した測線が、No.165-1 となっている。ただし、図-2.1.2 で用いた測量時期を示す番号は、No.165-1 について測量が開始された 1994 年 1 月を 1 番としているが、ここでは 3 測線で統一した番号として、1971 年 8 月を 1 番としている。

No.165-1 は、定期測量の開始以降は侵食傾向となっているため、最近の変動分程度しか現存する地表面を得ることができない。

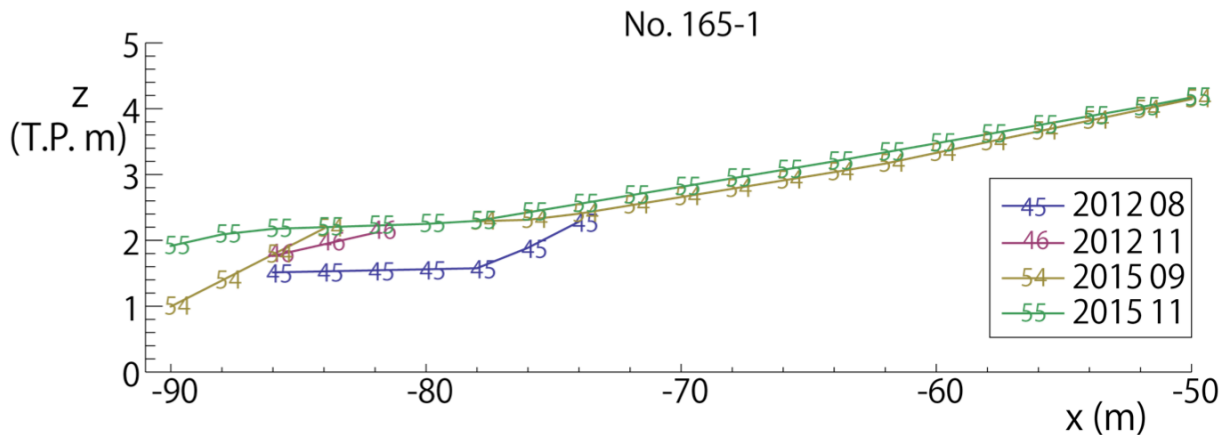


図-2.4.13 断面模様の推定結果(No.165-1)

c 露出面の解析 (No.165-1)

トレンチの堆積層の露出面を撮影した写真から合成されたオルソ写真を図-2.4.14a (現存する地表面の推定線有り) および図-2.4.14b (現存する地表面の推定線無し) に示す。

この測線は、前述のように現存する地表面として 4 時期分しか得ることができない。このことは、逆に露出面に見られる層理面は、定期測量を開始する以前の地表面であることを意味している。No.165-1 の定期測量の履歴は、2 章 1 節の図-2.1.2 の左上に示した。この図において、最も古い測量が 1994 年 1 月であるが最も海岸側に出ていた時期となっている。

したがって、定期測量から推定された現存する地表面よりも深い層理面の堆積時期を推定することはできない。この推定には富士海岸で実施したように ^{14}C 分析が考えられ、次節で議論する。

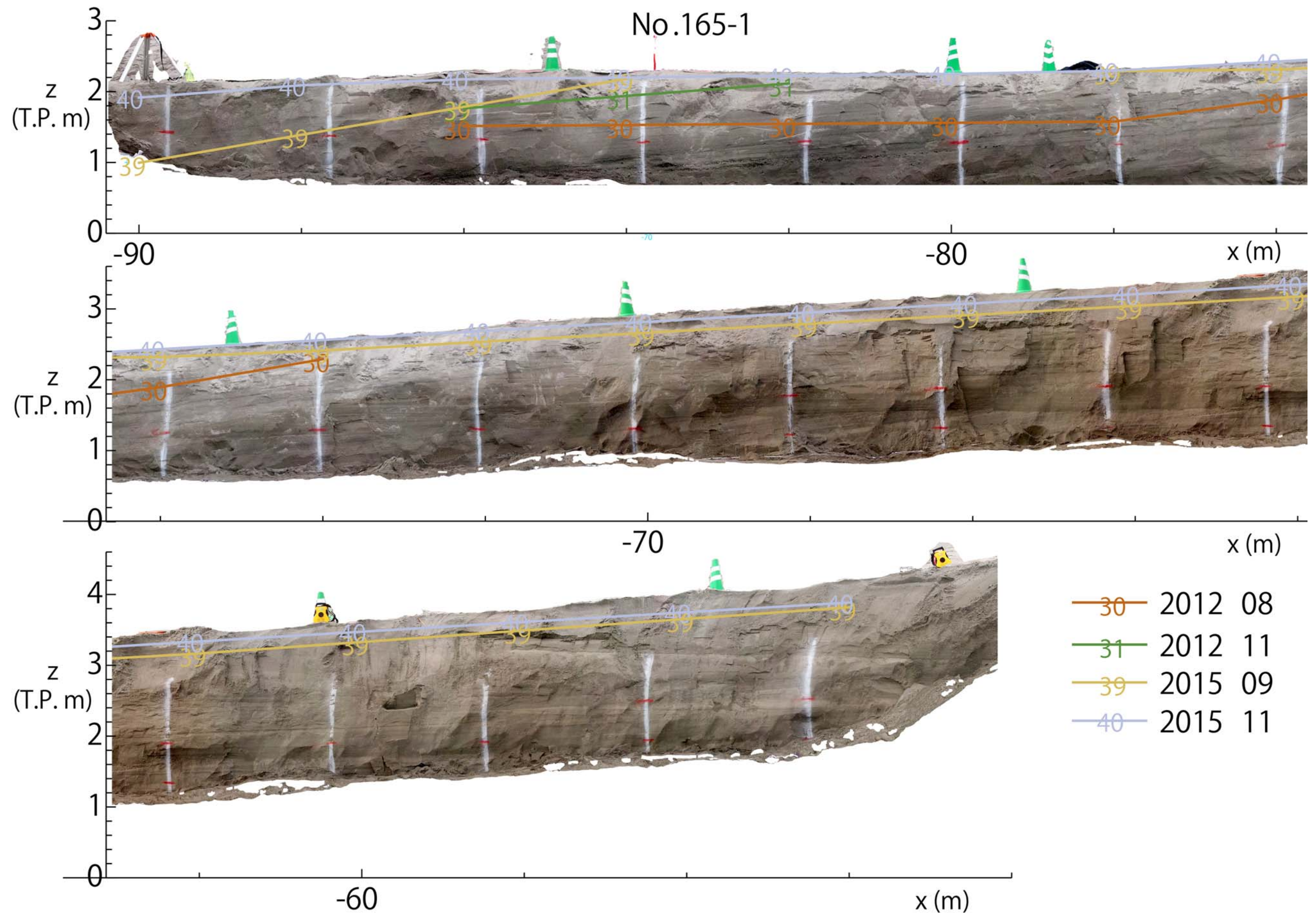


図-2.4.14a 堆積層露出面のオルソ画像と現存する海浜面の推定線 (No.165-1)

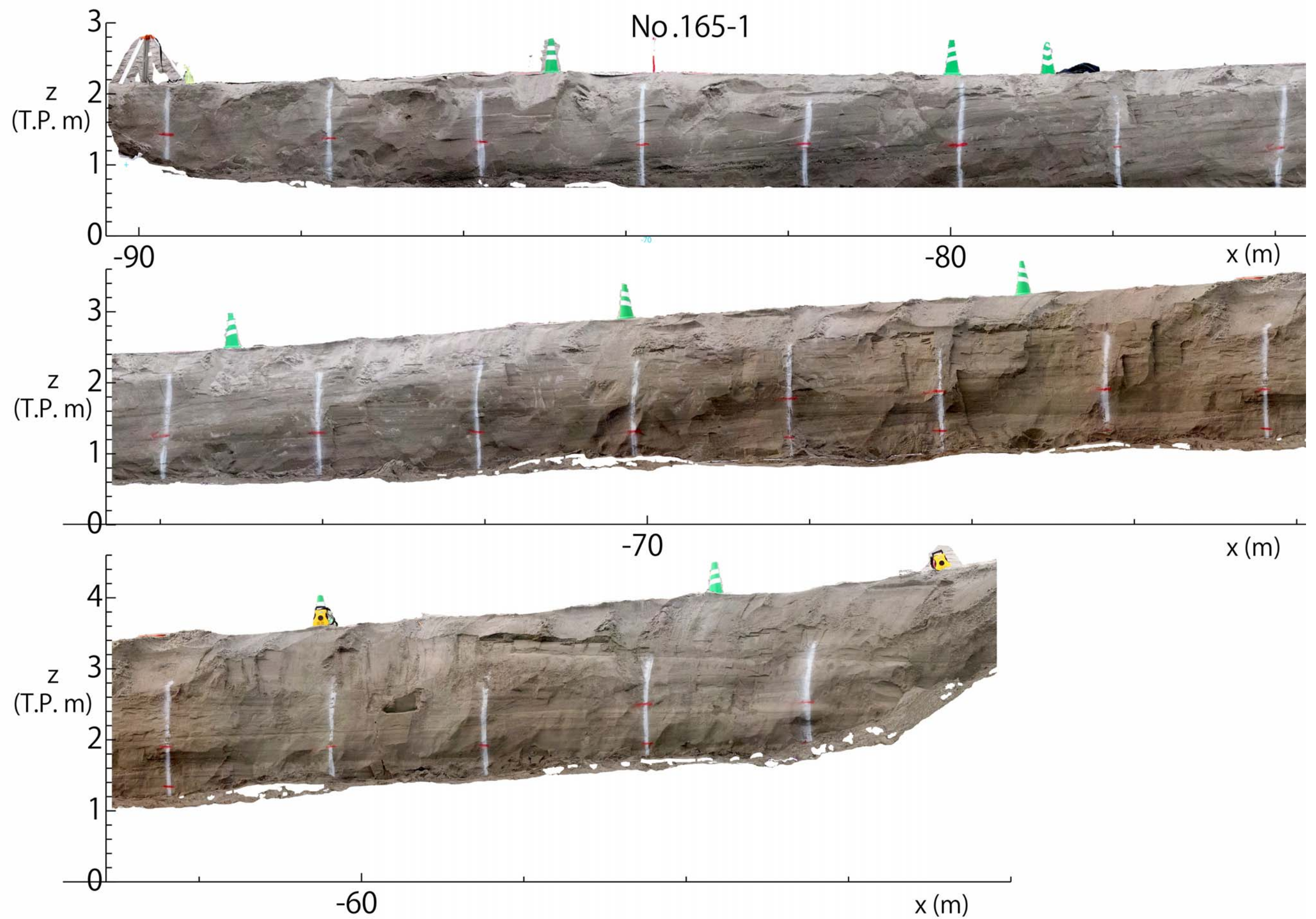


図-2.4.14b 堆積層露出面のオルソ画像 (No.165-1)

2.4.6. 浜松篠原海岸のトレンチ調査の考察

a 堆積層の模式図

図-2.4.15 にオルソ写真から抽出した礫層の模式図を示す。前の 2 海岸と同じく、粒度分析の結果によるものではなく目視による分類である。

図には、礫のみで構成される層を濃い色で、砂混じり礫層もしくは礫混じり砂層を灰色で塗りつぶして表示した。また、赤字と赤印で示したのは、粒度分析した底質試料の採取箇所と試料番号で、それらの粒度試験結果を組成別に大別したものを図-2.4.16 に示す。

3 つの測線を比較すると、それぞれの測線における養浜投入と離岸堤設置の経緯による影響が良く現れている。各測線の基点は、海岸線に沿った直線上に設置してあるので、汀線位置の違いは概ね浜幅の違いと見て良い。No.161 と No.163 は、ほぼ同様な浜幅となっているが、内部の状況を見ると堆積時期も堆積厚さも大きく異なっている。

No.165-1 の岸側奥の深い部分では、少ないながらも玉砂利が確認できる。数量が多くないことから、天竜川の河口が西遷した際のものではなく現在の河口から到達したものと推察される。

No.161 は 1 号離岸堤よりも沿岸漂砂の卓越方向の上手側であり、養浜地点に近いものの、前述のように馬込川以東からの供給途絶の影響を受ける範囲であるため顕著に厚い堆積層は見られない。一方で、No.163 は 2 号離岸堤の設置以降に養浜と離岸堤の効果により、著しい汀線前進が生じた範囲であり、この堆積環境のため砂礫混合の厚い堆積層やバーム形状が残されたと考えられる。

後の c 節において、2014 年 9 月と 11 月の間の層が形成された時期の推定を行うが、対象とする層にアルファベットで A～F を割り付けて示した。さらに、それらの層のバーム頂部の高さを水色の線で示した。A については、層の岸側上端部の高さも把握した。

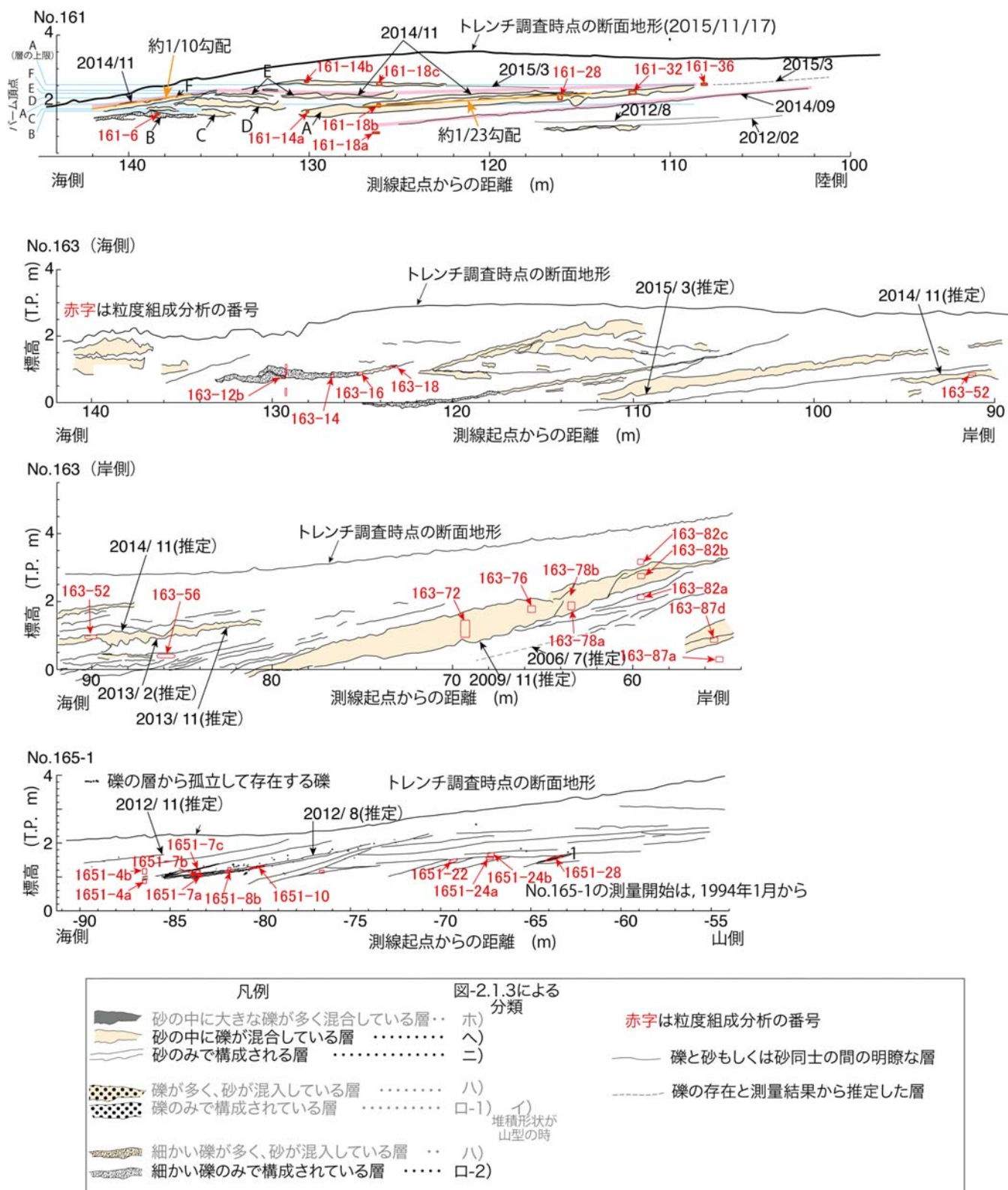


図-2.4.15 トレンチ断面から得られた礫の分布

b 堆積層の粒度組成

図-2.4.15 の図中の赤色で印した箇所から試料採取して粒度分析を行い、粒度組成として図-2.4.16 に示す。図は、上から順に漂砂上手からで、No.161, No.163, No.165-1 となっている。また、それぞれの測線内では、海側から陸側へ下層から上層へと粒度組成を配置してある。また、各側線の断面内で同一の礫層に属する試料の番号に、共通の色付けをして区別した。

これらの粒度組成を比較すると、礫が汀線付近に潤沢に存在する No.161 および No.163 では礫が岸側へ、かつ高くまでまとまって遡上していることが分かる。しかし、図-2.4.15 と合わせてみて分かるように、90%程度が礫で構成される礫が主体となる層の存在は少なく、かつては汀線付近であったと見られる標高 1m 付近に見られるのみである。

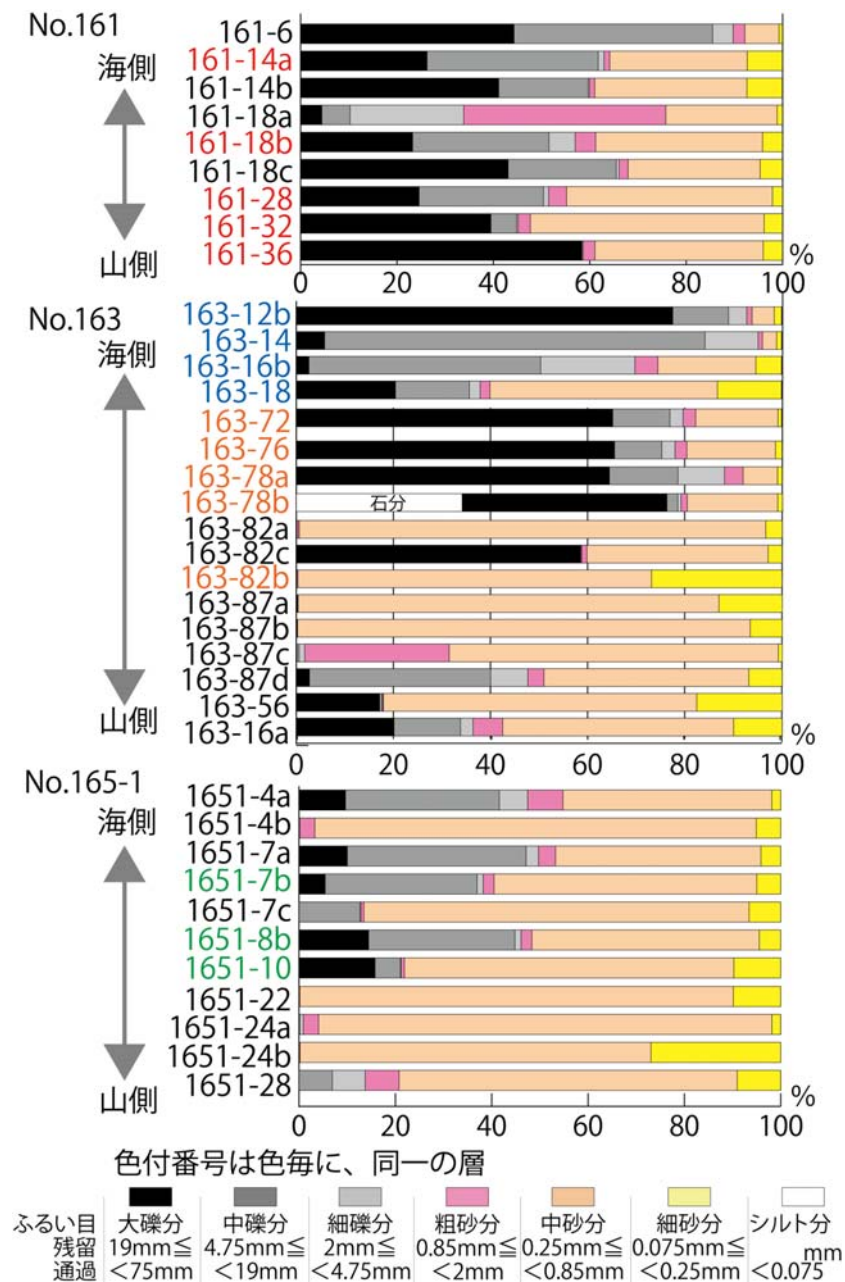


図-2.4.16 堆積層内の粒度組成

また、礫層の分布の詳細を調べた試料 163-12b, 試料 163-14, 試料 163-16, 試料 163-18 の系列では、礫層のみであった層が陸側になるほど礫の比率が減っている。これらから礫層のみで構成される部分が、かつてのカस्पやバームの頂部であったと推察できる。

また、No.165-1 では、厚い砂層の下となる試料 1651-28 にまとまった礫層が存在している。この礫層の組成は他のものと異なり粗礫分を含んでいない。また、図-2.4.13 からこの断面では古い時期の測量が消失していることが分かるので、残存している断面は、測量が開始された 1994 年 1 月以前のものが露出していることになる。養浜が開始されたのが 2006 年であるので、試料 1651-28 に含まれた礫は養浜材ではない。したがって、養浜投入以前でさらに 1994 年以前に天竜川から供給された底質と考えられる。河川からの直接のサンドバイパスとして養浜を実施すると礫が目立つようになるが、この沿岸に元来、このような底質がまとまって存在していたことがあることを示している。

石川ら（2010）は前浜から後浜において礫の粒径に応じた前浜に選択的な堆積が生じるとしているが、後浜への礫の選択的な移動を促すものとして、礫の扁平性が考えられる。その例を、写真-2.4.12 に示す。砂層の表面上に比較的粒径が大きく、かつ扁平な礫が点在していた。これより、波の遡上の際に揚力を受け易い扁平な礫が波に乗って遡上したものと推察される。



写真-2.4.12 砂層間に取り残された扁平礫

c 2014 年 9 月と 11 月の間に主要な層が形成された時期の推定

図-2.4.15 に示したように、No.161 の礫層には、2014 年 9 月と 11 月の測量時点に対応する群が判別できる。この期間の礫層を図-2.4.15 中にアルファベットを割振り A~F とした。このうち A と C は調査時点ではトレンチの足下付近のため不明瞭であるが連続した層と考えられる。そこで、これらの層の間の堆積状況と外力を関連付けることを試みた。

これらの層序は標高と岸沖方向から、B, C-A, D, E, F の順に形成されたと推定される。以下では、外力と関連づけてそれらの形成時期を特定する。

対象期間の外力の来襲状況として、図-2.4.17 に静岡県袋井土木事務所竜洋観測所の波浪データの波高を最上段に周期を 2 段目に、 H^2T としたエネルギーフラックスを上から図中の 3 段目に、気象庁舞阪検潮所の潮位データを最下段に示す。高波浪のピークは、9 月 25 日 7 時の低気圧によるもの、28 日

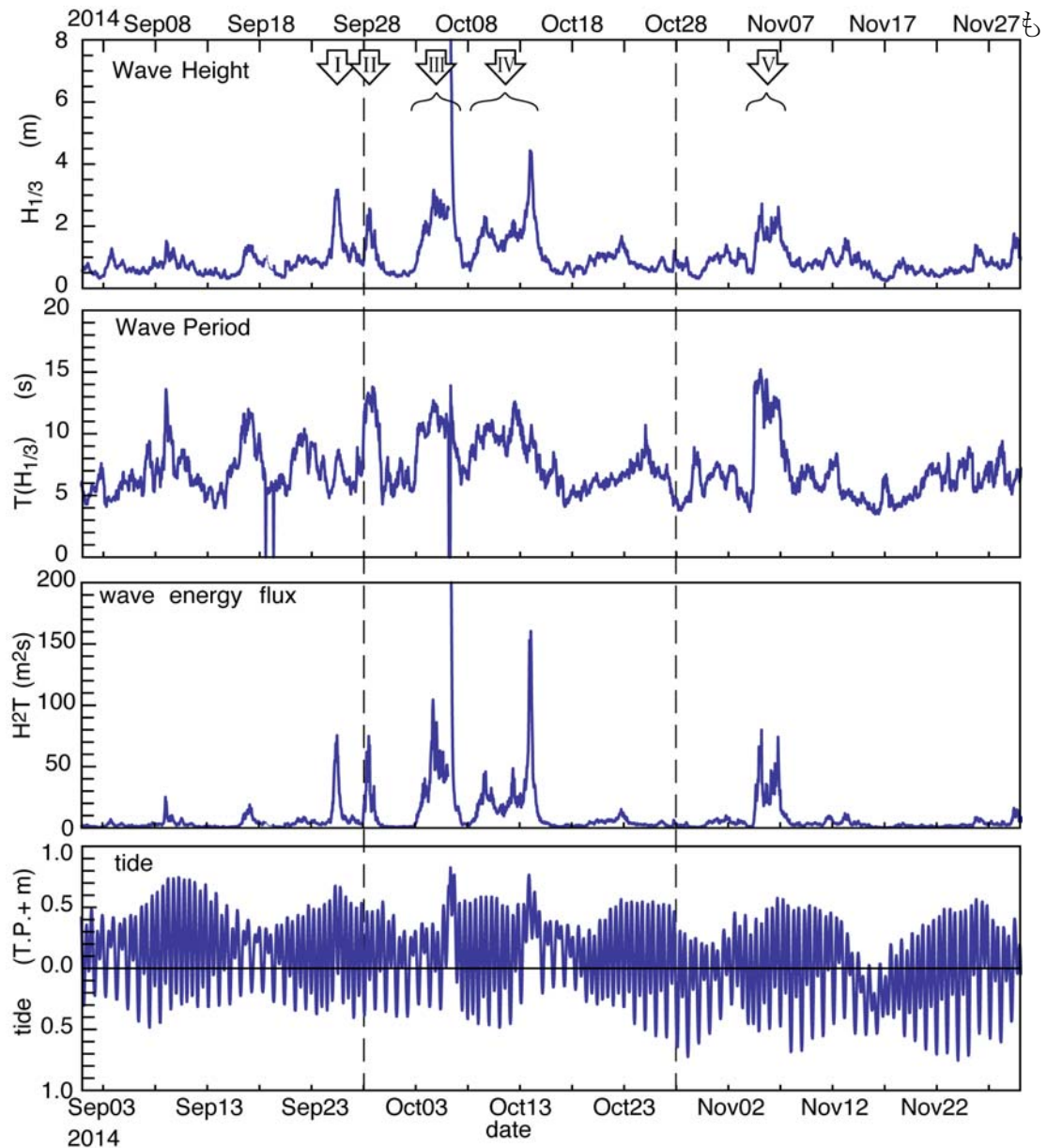


図-2.4.17 海象データ（竜洋観測所，舞阪験潮場）

の，10月6日8時の台風1418号の直撃によるもの，10月14日0時の台風1419号の直撃によるもの，11月5日5時の南方に停滞する台風1420号によるもの，11月6日21時の台風1420号が温帯低気圧となり東方へ移動して南東の位置となってときのものの7つが確認できる。

図-2.4.17に示した外力は，沖側のものとなるため遡上域への影響を比較するために，うちあげ高をパラメーターに導入することを考えた．うちあげ高の算定は，不規則波としての扱いが可能な玉田ら（2009）の手法を用いた．

$$R_{1/3} / H_0 = 2.17 - 2.18 \exp(-0.70 \tan \alpha / (H_0 / L_0)^{1/2}) \quad \dots \dots \dots (2.4.1)$$

H_0 ：沖波波高， L_0 ：沖波波長， $R_{1/3}$ ：有義波相当のうちあげ高

この時の α は，中村の改良仮想勾配法により算定するが，その際に必要となる碎波水深はSunamura（1980）による次式から求めた．

$$H_b / H_0 = (\tan \alpha)^{1/5} (H_0 / L_0)^{-1/4} \quad \dots \dots \dots (2.4.2)$$

$$H_b / h_b = 1.1 (\tan \alpha)^{1/6} (H_0 / L_0)^{-1/12} \quad \dots \dots \dots (2.4.3)$$

H_b : 碎波波高, h_b : 碎波水深, $\tan \alpha$: 以下参照

ここで海底勾配 $\tan \alpha$ には, 代表断面として No.161 を採用して図-2.4.18 に示した深浅測量から解析期間の 4 時期の平均地形を作成して, バーの岸側の最深部から標高 0m までの勾配 1/55.6 を固定値として採用した. したがって, 頻繁に生じる地形の詳細な変化によるうちあげ高の変動を表現できず, 砂浜への外力と大まかな遡上範囲を示すものである.

式(2.4.1)～式(2.4.3)を用い, 波高, 周期の観測値からうちあげ高の時系列を算出した. さらに, 図-2.4.18 の標高を潮位の観測値に従って上下に平行移動させた断面地形を用いて計算することで潮位変化を考慮したうちあげ高の時系列を算出した. この結果を図-2.4.19 に示す.

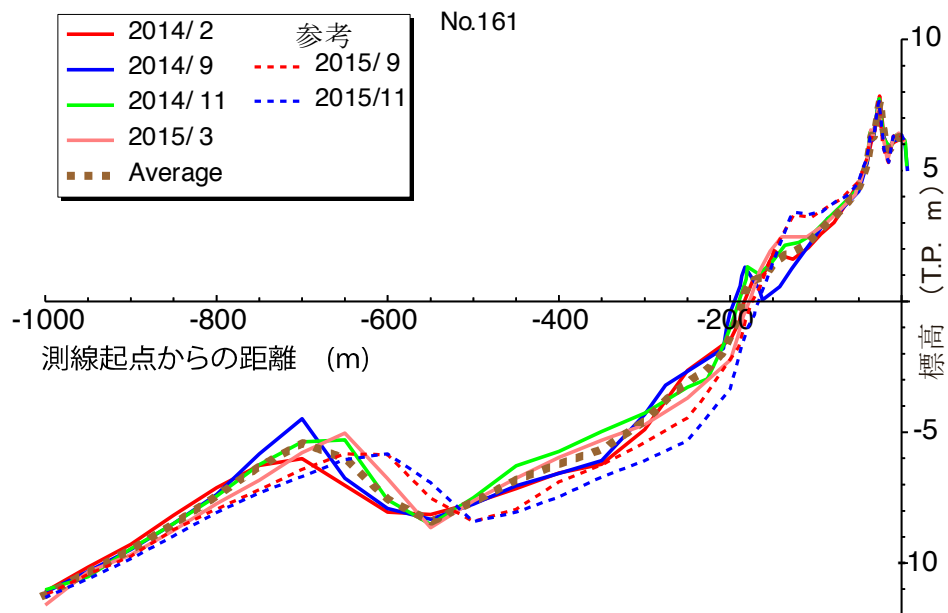


図-2.4.18 うちあげ高計算に用いた代表断面地形

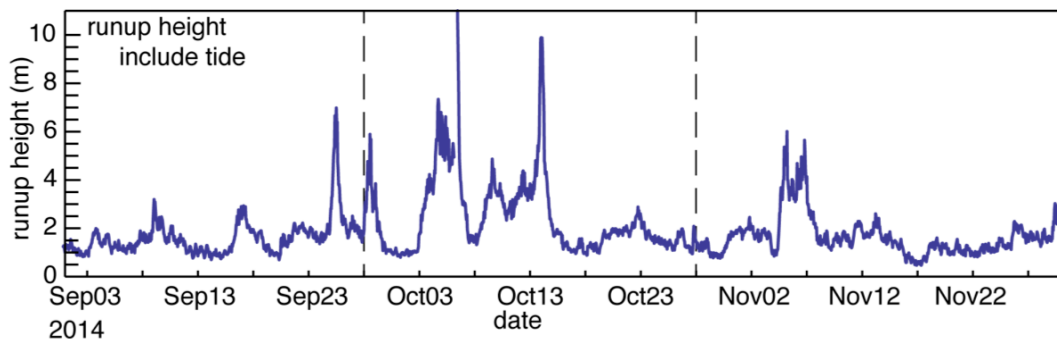


図-2.4.19 うちあげ高 (潮位考慮)

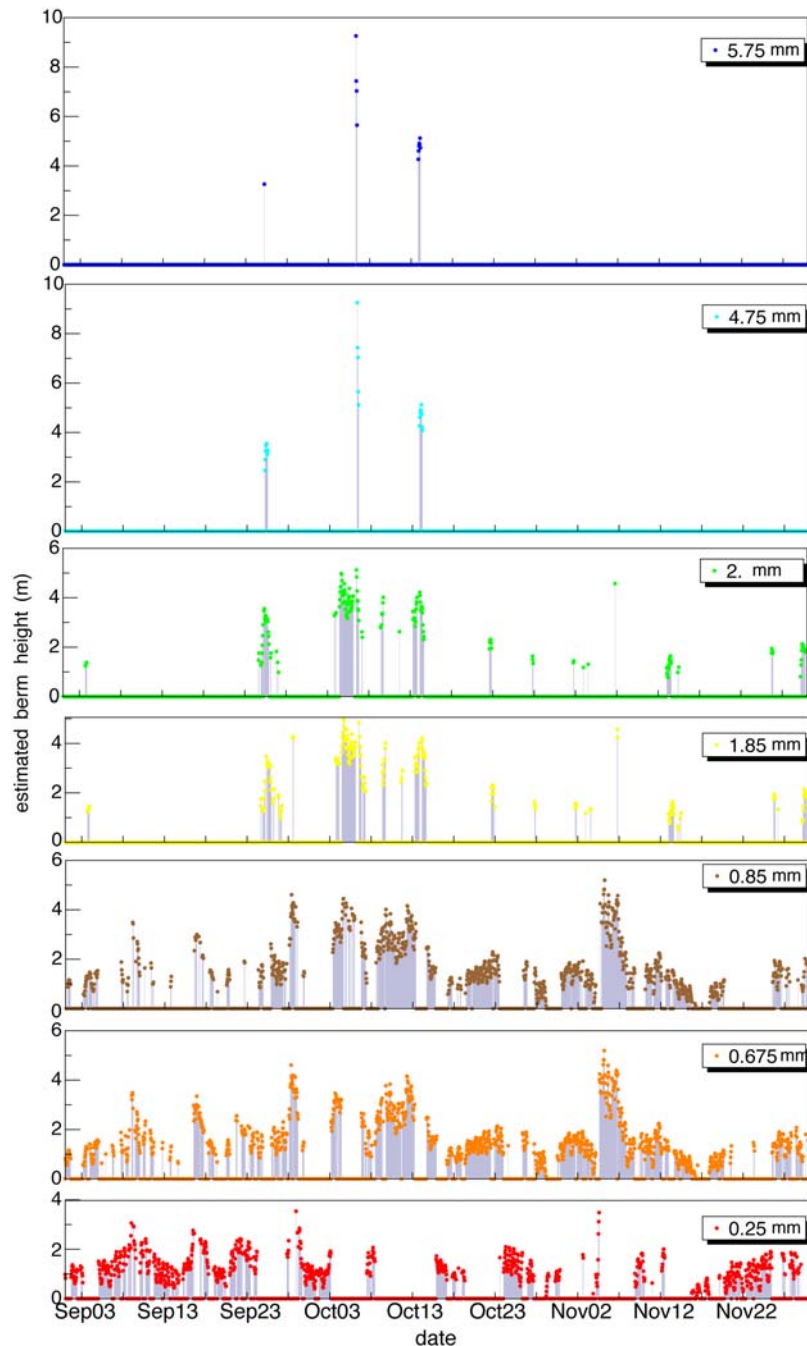


図-2.4.20 粒径毎のバーム高さの推定値

図-2.4.21 は、砂礫がバームの形成に向けて移動するか否かを擾乱同士で比較しやすいようにしたものである。上段図は、図-2.4.20 を粒径が細かい成分から粗い成分へ順に重ねたものであり外力が地形を変化させる強さとしてバームの高さを縦軸に示した。また、図-2.4.15 で水色の線で示した層のバーム頂部の高さを、各層が形成されたと推定した時期に合わせて示した。下段図は、粒度別にバームが形成されるか否かを示したもので、バーム高さを色の濃さで示したものである。

したがって、下段図では、粒度に対して波浪が小さくバームを形成しない場合は薄色で、形成する条件では黒色、波浪が大きくなり細かい粒径のもの

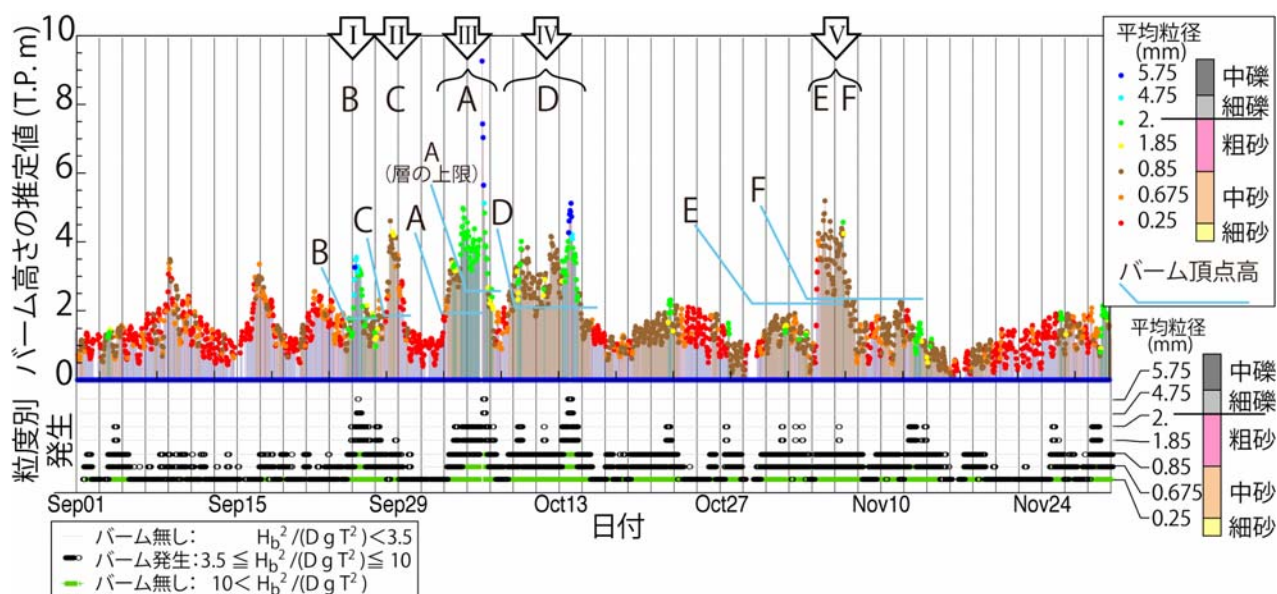


図-2.4.21 粒径毎のバーム高さ推定値の重ね合わせ（上段）と
粒径別のバーム発生条件（下段）

がバームを形成できなくなると緑色となる。上段図で通常時には暖色系となっており、砂のみが活発に移動していることが分かる。

これを念頭に図-2.4.15 の堆積層の模式図に記した No.161 の 2014 年 9 月～10 月に形成された A～D の層の形成時期を推定する。まず、層序の上下順により E→F および B→C→D→E は自明である。最も長く厚い A が、B→C→D のいずれかの延長であるか、もしくは間に入るかが、考察の中心となる。以下では、先に堆積したと推定される順（古い順）に示す。

1) 最下の B 層は、粒度分布を整理した図-2.4.16 の 161-6 に相当する。礫が大部分を占めていることや陸側への広がりが少ないことから、砂成分のバームではなく礫がバームを形成可能な 9 月 25 日から始まる擾乱 (I) で形成されたと考えられる。この擾乱は、図-2.4.22 に示した天気図から前線の通過に伴う高波浪で、周期が長くないことから南方にある台風 17 号の影響では無い。上段図からバームを形成する礫の種類および高さの推定とトレンチから得られたバーム頂部高さ（図中の水色線の B）が整合していることが分かる。

2) C 層が 9 月 28 日の擾乱 (II) で形成されたと推定した。下段図からこの擾乱で動いた材料のほとんどは砂成分だけであることが示されている。波高はそこそこであるが周期が長くなっている。図-2.4.23 の天気図を見ると伊豆諸島の東方を台風 17 号が通過している。調査地点の浜松篠原海岸に対しても、東側となり台風の進行方向左手で距離も離れていることから風波の伝播は小さく、長周期の波のみが到達したと考えられる。

3) A 層は、陸側の奥 109m まで、水色線の A（層の限界）と示した T.P.2.5m まで続く厚い層となっている。これより岸側は、2015 年 3 月の地表面に擦りついており侵食を受けたのか否かは不明であるので、遡上高さは T.P.2.5m 以上と考えられる。また、図-2.4.6 でこの層で得られたサンプルには、礫成分が多く含まれている。したがって、礫成分が移動する条件が必要である。また、A 層については、層が陸側へ長く形成されており、バーム頂部高さと層の陸

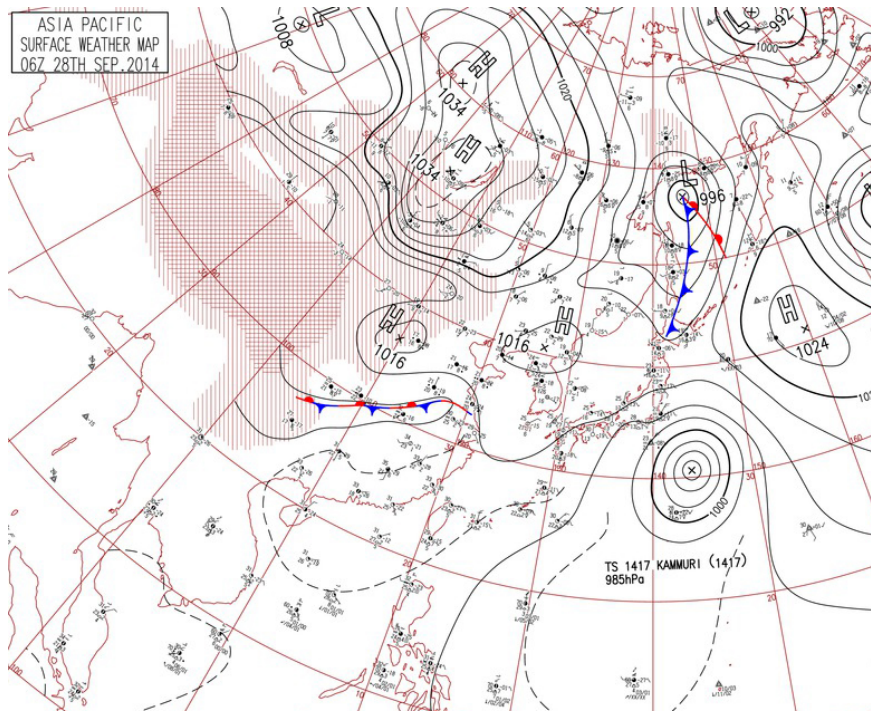


図-2.4.22 2014 年 9 月 25 日 12 時の天気図；赤い丸が調査点の目安（原典：気象庁「天気図」、加工：国立情報学研究所「デジタル台風」を一部トリミング）

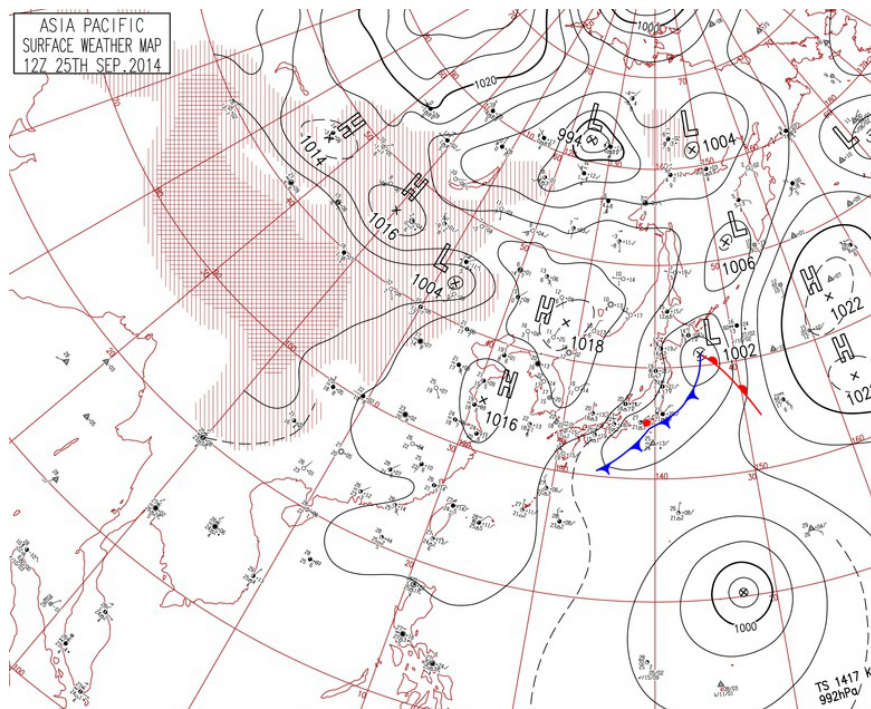


図-2.4.23 2014 年 9 月 28 日 6 時の天気図（原典：気象庁「天気図」、加工：国立情報学研究所「デジタル台風」を一部トリミング）

側上端部の高さが把握できており、このことから 10 月 3 日から始まり 10 月 7 日まで続く長い擾乱 (III) で形成されたと考えられる。特にこの擾乱は、台風 18 号によるもので図-2.4.24 に示す経路となっていた。図-2.4.17 に示し

た舞阪の験潮記録によると潮位が高くなっていることから陸側に形成しやすい状態となっていたと考えられる．台風が遠方にあるときには周期が長い波によりバームが作られ，直撃時には高波浪による高潮位により高い遡上が生じたと考えられる．さらに，終盤には台風が調査地域を直撃し通過している．この時には，図-2.4.21 の紺色（上段図）のバーム形成条件はバーム高さの実測値の水色線 A を越えていることや水色線 A（層の限界）はさらに高いことから，台風の直撃時に礫が移動し陸側へ拡散して砂層内に点在する礫となったことを説明することができる．また，この層は砂成分も多く含んでおり，前面の礫で構成されるバームの B 層を残したまま堆積している．したがって，水位が高い状態や波長が長く遡上波の水脈が厚い等の条件が揃ったことで，

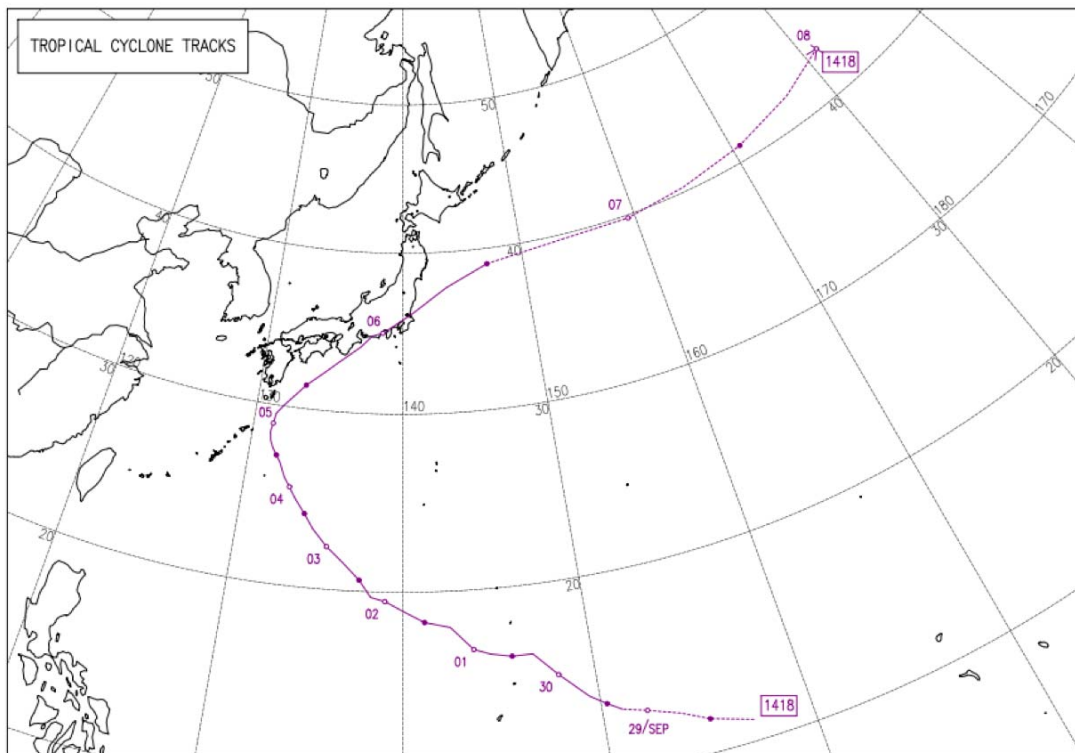


図-2.4.24 2014 年台風 18 号の経路（気象庁「台風経路図」）

4) D 層については，10 月 6 日から 13 日の擾乱（IV）によるものとした．図-2.4.25 に示すように台風 19 号が 10 月 6 日未明に東経 140 度線を西向きに通過し，この頃から周期に影響が現れ始めている．その後，沖縄本島に上陸して日本列島に沿うように移動した．10 月 12 日～10 月 13 日未明に温帯低気圧になり，10 月 13 日に直撃したもので潮位も上昇した．図-2.4.15 で A の上に E よりも下となる層がもう一つありこれが D の延長であり 10 月 13 日のピーク時には潮位もうちあげ高も 9 月 28 日と同等であるので，A と類似の層を形成したと考えられる．

5) F および E は，11 月 5 日から 7 日にかけての擾乱（V）で台風 20 号によるものと推定した．台風 20 号は，本土上陸せずに南岸遠方を通過した台風であり，東経 138 度付近で温帯低気圧に変わっている．F は，比較的勾配がある斜面の前面に張り付く形で堆積している．これは，藤川・田島（2016）が

サンゴ砂を用いた州島形成実験で示した形成過程と類似している．このような堆積過程は，次の 3 章の実験でも確認できるが，周期が長い波により生じたと推定される．図-2.4.17 で見られるように周期が長い波が来襲し続けており．そこに連続したものが，バームを越えて堆積したのが E であると推定した．

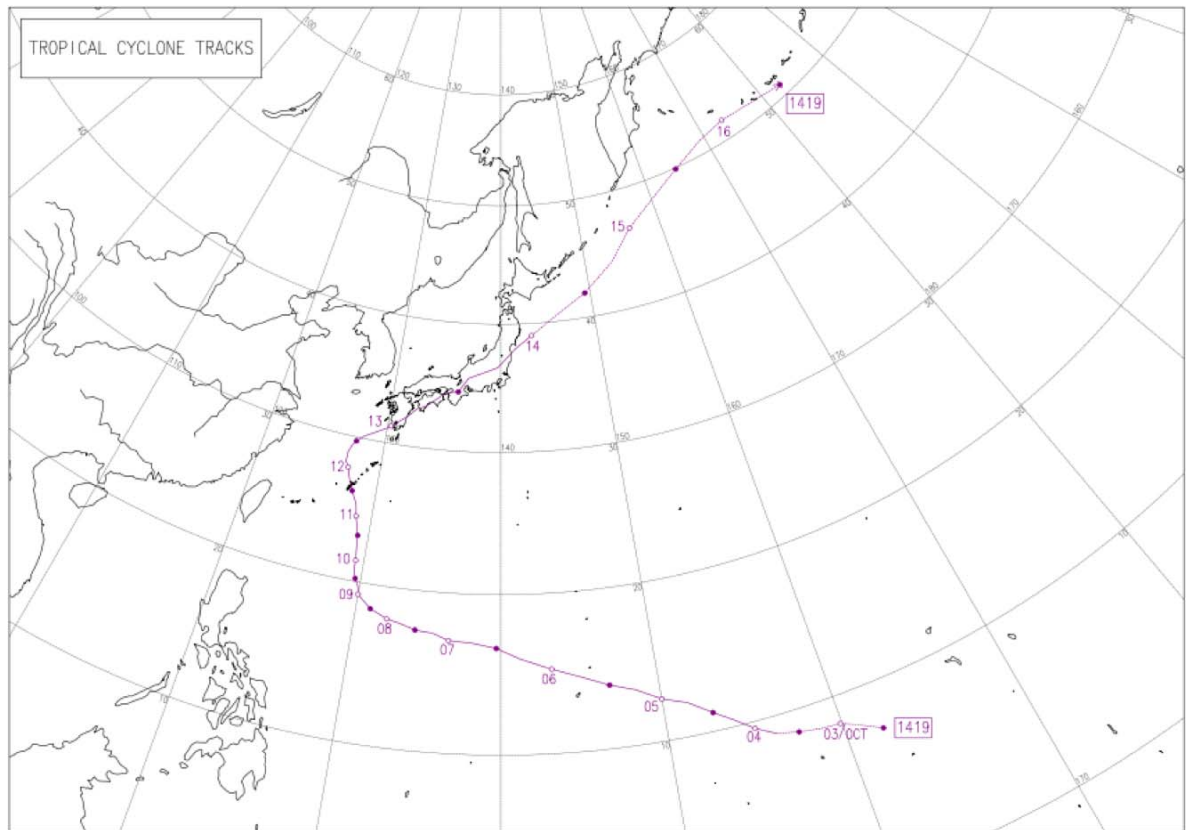


図-2.4.25 2014 年台風 19 号の経路（気象庁「台風経路図」）

d 堆積層の年代測定

No.163 および No.165-1 で採取した貝殻について放射性炭素年代測定（以下、 ^{14}C 年代測定：（株）加速器分析研究所実施）を行った。No.163-a ($x = -61\text{m}$, $z = \text{T.P.} + 1.22$)については、 2σ 暦年代範囲：1705calAD - 1903calAD (89.1%)と推定された。暦年較正年代グラフを図-2.4.26 に示す。図の読み方は、2.3.6b 節で示したとおりであるが、試料が貝殻であることから校正曲線に Marine13 を用いている。海洋性の貝殻に含まれる ^{14}C は、大気由来でないものを含んでいる可能性があり年代推定の精度は低くなっている。

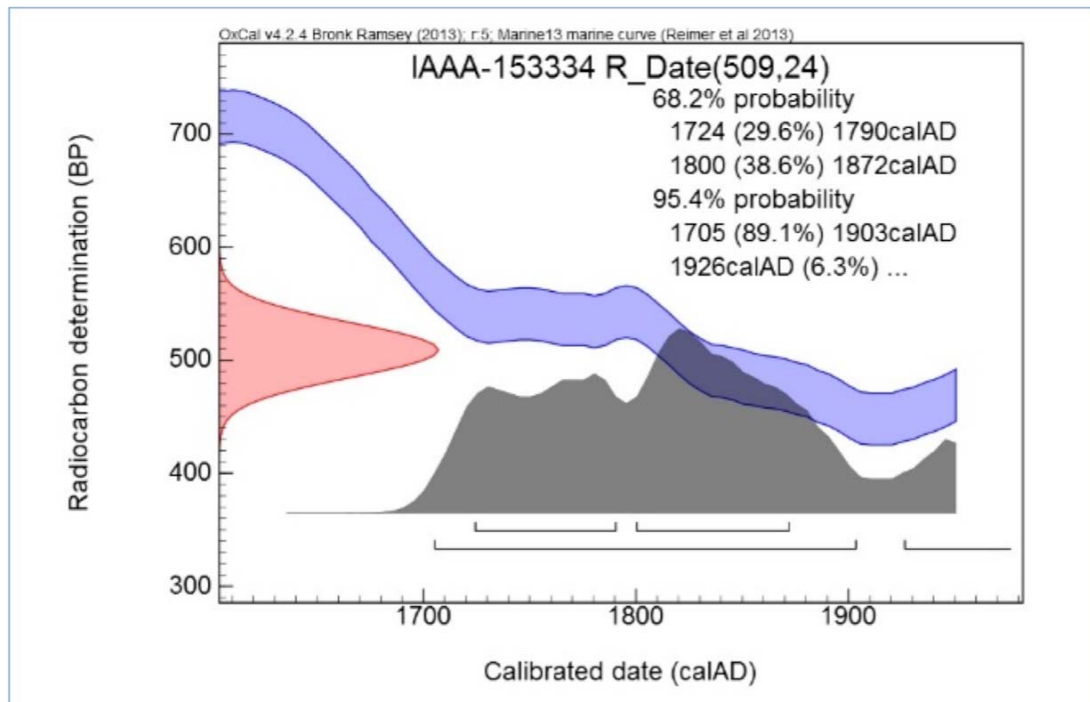


図-2.4.26 No.163 から採取した貝殻に対する暦年較正年代グラフ

2.4.7. 浜松篠原海岸のまとめ

天竜川を漂砂源とし河口から西へ広がる砂浜海岸の一区間である浜松篠原海岸の砂礫混合養浜の効果を生かすために設置された 3 基の離岸堤の上手側、間、下手側の測線でトレンチ掘削調査を行なった。各調査測線では、3 基の離岸堤の設置順により、砂礫混合養浜の到達する礫成分に違いが生じている。3 測線のトレンチの堆積層からサンプルを採取し粒度の構成と発見された木質系試料を ^{14}C 測定し年代を調べた。また、堆積層を判読し、測量で得られた地表面の履歴と海象観測結果から堆積層を形成した海象イベントを推定した。主な結論を以下に示す。

- 1) 元来砂浜海岸である浜松篠原海岸では、礫のみで構成される層は稀である。
- 2) 礫を含む層の形成時期を武田・砂村（1983）のバームの形成条件と高さの推定式、海象条件および礫の散在状況から同定することができた。このことから、層の形成には、波高だけでなく潮位と周期も大きく関係することが分かった。

- 3) 測量開始以前の層から玉砂利を含む層が確認されたことから、養浜開始前の自然漂砂の状態時期にも天竜川より礫の供給があったことが確認できた。
- 4) 岸側に孤立して点在する礫は、扁平のものが多く大きさは様々である。これらは、遡上水脈中で揚力を受けて滑走することで、岸側奥まで到達したと推察される。

参考文献

- 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.
- 宇多高明・石川仁憲・三波俊郎・青葉佳宏・大井戸志朗（2014）：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, pp.I_691-I_695.
- 宇多高明・石川仁憲（2005）：実務者のための養浜マニュアル，（一財）土木研究センター，169p.
- 佐藤慎司（2008）：遠州灘浜松海岸の土砂移動実態，土木学会論文集 B, Vol. 64, No. 3, pp.192-201.
- 静岡県（2014）：第 17 回遠州灘沿岸侵食対策検討委員会 付属資料，<http://www.pref.shizuoka.jp/kensetsu/ke-320/measures/documents/17-2.pdf>.
- 静岡県（2015）：第 18 回遠州灘沿岸侵食対策検討委員会 検討資料，<http://www.pref.shizuoka.jp/kensetsu/ke-320/measures/documents/18-1.pdf>.
- 武田一郎・砂村継夫（1983）：砂浜海岸の堆積過程における地形変化，第 30 回海岸工学講演会論文集，pp.254-258.
- 藤川大樹・田島芳満（2016）：潮汐を考慮したサンゴ州島形成過程の再現実験，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，第 72 巻，pp.553-558.
- 玉田 崇・間瀬 肇・安田 誠宏（2009）：複合断面に対する波の不規則性を考慮した打上げ高算定法に関する研究，Vol. 65, No. 1, p.I_936-I_940.
- Sunamura, T. (1980) : A LABORATORY STUDY OF OFFSHORE TRANSPORT OF SEDIMENT AND A MODEL FOR ERODING BEACHES, *Coastal Engineering. ASCE*, pp. 1051-1070.
- Takeda, I. (2003) : Stability and Height of the Landward Limit of the Backshore at Japanese Beaches, *Journal of Coastal Research*, Vol. 19, No. 4, pp. 1082-1093.

2.5. 海岸底質による耐波侵食性の違い

2.5.1. 各測線の汀線位置の変化

汀線変化から礫を含む量の違いによる海浜の耐波侵食性を、汀線変化量から検討することを考える。それぞれの海岸における解析期間は、静岡清水海岸については No.60 と No.75 の汀線が前進に転じた 2005 年以降とし、富士海岸については吉原地区の礫養浜を始めた後とし、浜松篠原海岸については 3 号離岸堤が完成した後とした。各測線の漂砂環境を再整理したものを表-2.5.1 に示す。太線で囲んだ測線は各海岸の測線の中で、養浜材による底質の変化による影響がなく、外力の変化に対してその海岸が元来有している変化が生じる測線としたものである。

図-2.5.1～図-2.5.3 に汀線位置の変化を海岸毎に測線を重ね合わせて示す。静岡・清水海岸の調査地点について示した図-2.5.1 から、汀線位置は No.13 では侵食傾向のトレンドを No.60 および No.74 では堆積傾向のトレンドを有していることがわかる。富士海岸の調査地点の図-2.5.2 から、汀線位置は No.43 で微増しているものの全体としては顕著なトレンドは見られない。浜松篠原海岸の調査地点については、図-2.5.3 から養浜下手で 1 号離岸堤の上手に位置する No.161 では大きな堆積傾向として現れており、No.163 では離岸堤に囲まれているために No.161 よりも傾向が小さく現れ、No.165-1 は侵食傾向が示されている。

海岸の地形変化は、恒常的な侵食傾向や堆積傾向のトレンド成分と季節変動や台風等によるイベント成分が合成されたものとなっている。イベント成分における汀線の変動量を求めるために、汀線位置の時系列からトレンド成分を除去する。トレンド成分を除去する方法としては、漂砂環境が大きく変化しない区間を設定することでトレンド成分を $y=ax+b$ (トレンド直線と呼ぶ) で表現できると仮定して最小自乗法により a, b を求めて各図中に点線で示した。時間軸方向原点 ($x=0$) が解析ソフトウェアを用いた都合上で 1900 年 1 月 1 日 0 時 0 分 0 秒となっており、 b はその y 軸切片であるので特別な意味はない。 a を年間の値に変換したものを表-2.5.1 の最下行に記載した。養浜の下手では前進しており、浜松篠原海岸の No.161 では 11.7m/年の前進となっており養浜の効果が大きい。

表-2.5.1 各測線の漂砂状況

特徴	海岸名	静岡・清水海岸			富士海岸			浜松篠原海岸		
	解析期間	2005 年～2013 年			2003 年～2014 年			2005 年～2015 年		
	測量頻度	年 2 回			年 1 回			年 4 回		
	No.	13	60	75	43	51	79	161	163	165-1
砂成分(汀線付近)		少	少	多	少	少	多	多	多	多
礫多い			●		●	●	○	●	●	
養浜下手			●		●			●	△	
河口近傍				●			●			
漂砂系下手		●			●					●
年間変化量(m/年)		-3.4	1.1	1.8	1.2	0.7	-0.3	11.7	7.3	-3.7

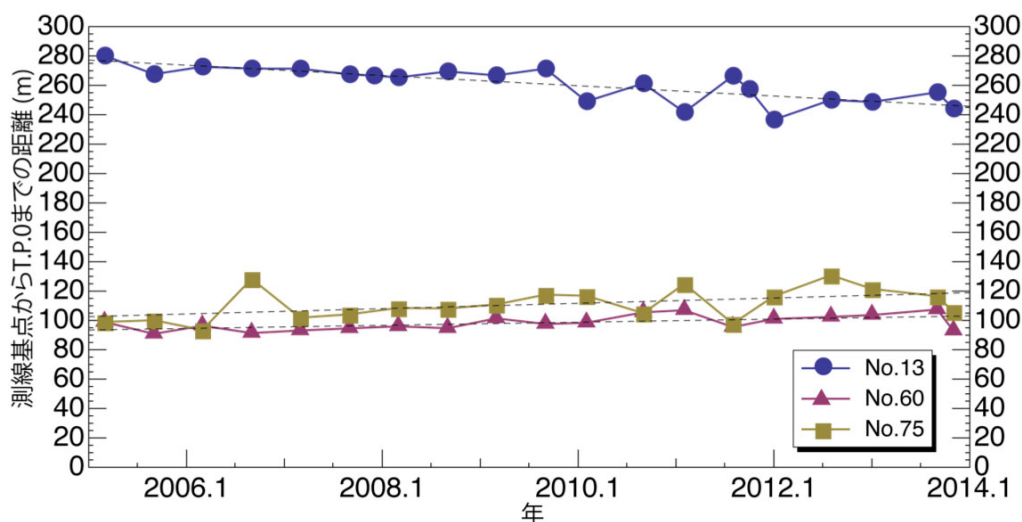


図-2.5.1 静岡・清水海岸のトレンチ調査地点近傍の汀線位置の変化

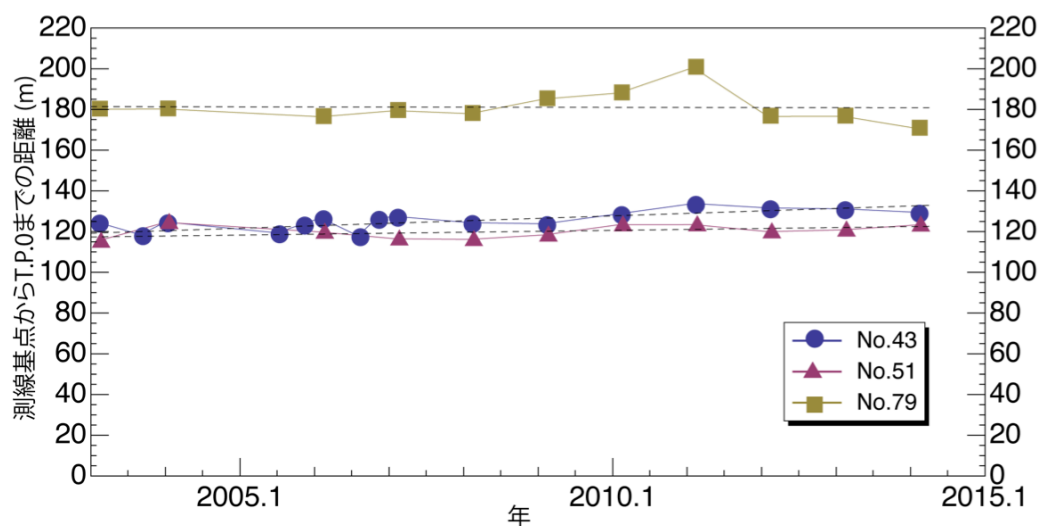


図-2.5.2 富士海岸のトレンチ調査地点近傍の汀線位置の変化（吉原養浜開始以降）

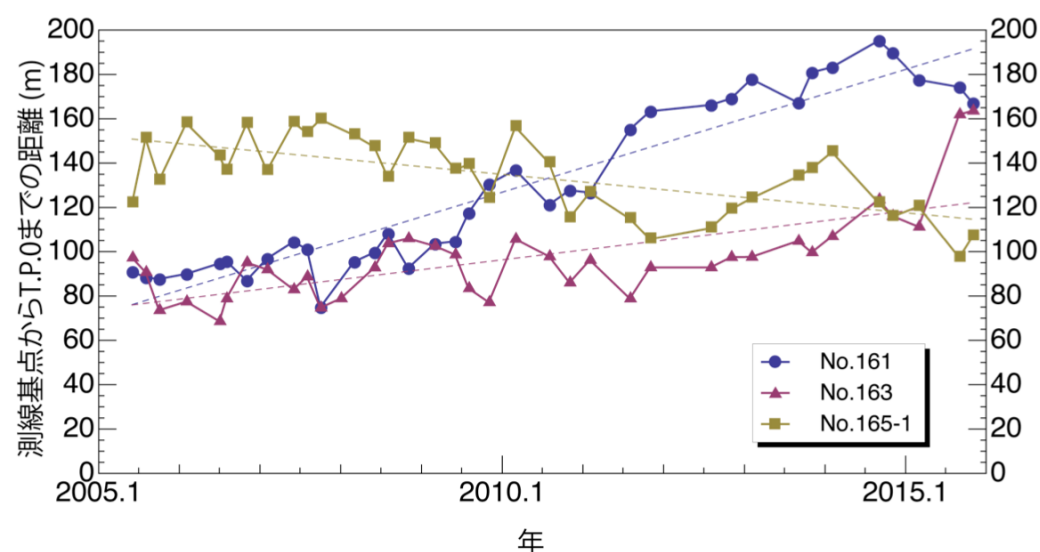


図-2.5.3 浜松篠原海岸のトレンチ調査測線の汀線位置の変化（3号離岸堤設置以降）

トレンド成分とイベント成分の分離は、砂浜の管理においても意味がある。トレンド成分は供給土砂量の変化や構造物の設置等に起因しており、これを改善するのがサンドバイパスやサンドリサイクル等の恒常的に実施する養浜の目的である。トレンド成分の傾きをどの程度小さくするかが恒常的な養浜の性能となり、養浜計画の決定に重要な要素となる。

トレンド直線からの差分を、トレンドを除去した汀線の位置とした。この結果を海岸毎に図-2.5.4～図-2.5.6に示す。

測線基点からの距離を分離せずに同時に除去しているためトレンド直線を中心とした分布となっている。このことから、この方法でトレンドを定式化して除去してイベント成分のみにできることがわかる。また、測量時期が同じデータ同士で対にすることで優劣を比較するために、他の測線と時期が異なるものは削除した。

変動幅は静岡・清水海岸では概ね±20mの範囲、富士海岸では概ね±10mの範囲、浜松篠原海岸では概ね±30mの範囲に収まっている。

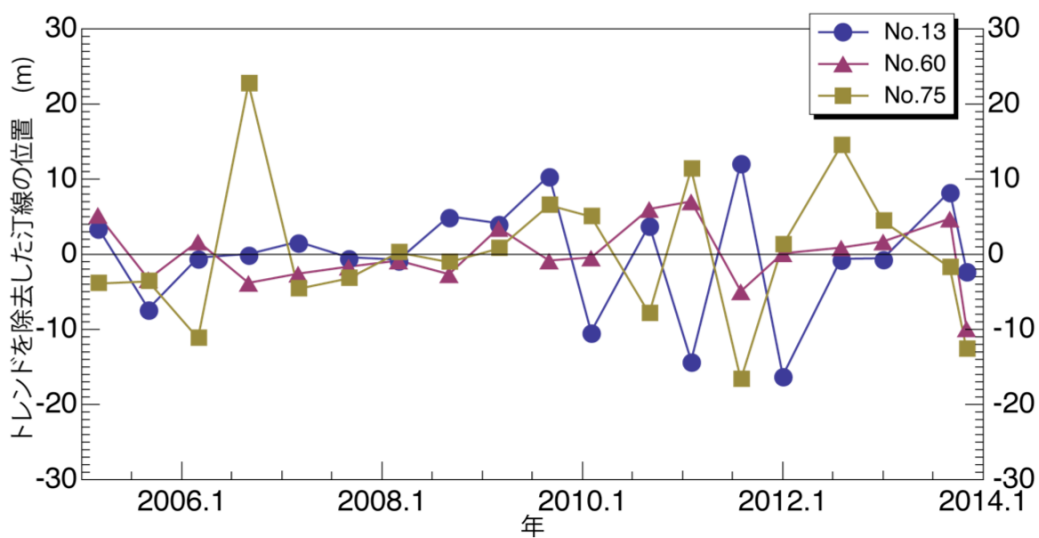


図-2.5.4 静岡・清水海岸の汀線位置の変化（トレンド除去後）

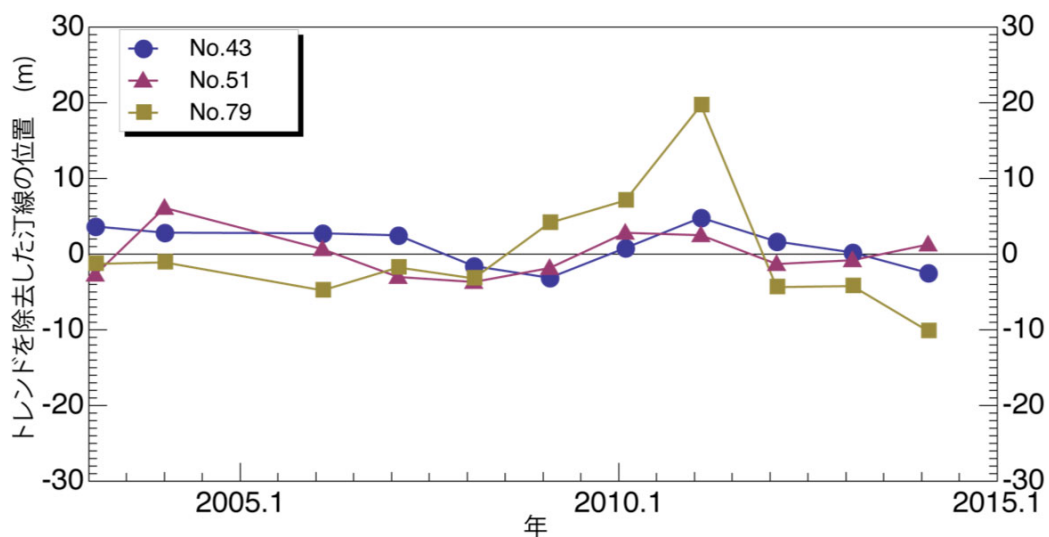


図-2.5.5 富士海岸の汀線位置の変化（トレンド除去後）

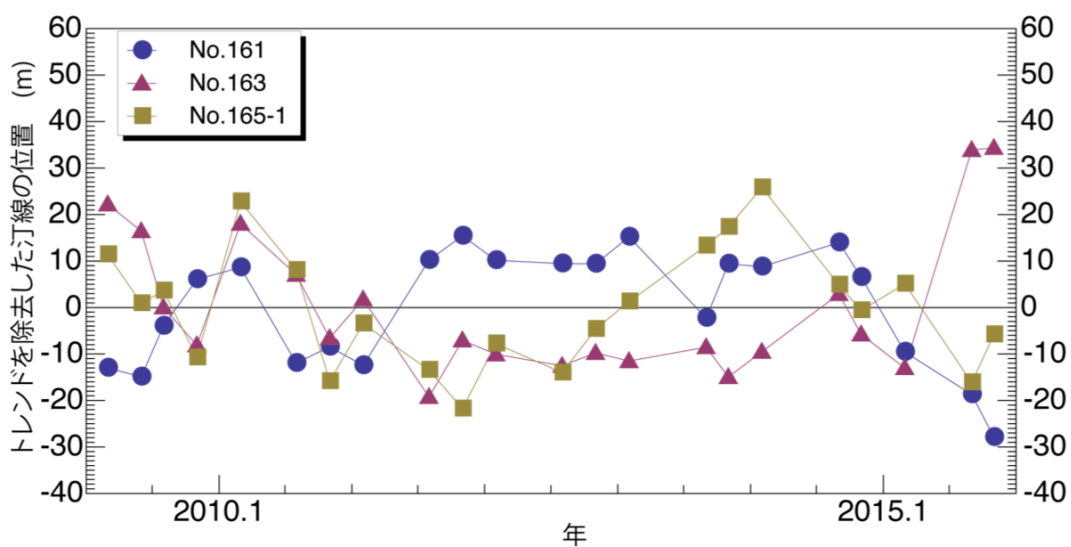


図-2.5.6 浜松篠原海岸の汀線位置の変化（トレンド除去後）

以上で示した汀線位置の変化は、各測線の基準点からの汀線の距離と時刻（年月）で示されたものであり、時空間的な位置を示すデータである。そこで、侵食・堆積の変動状態を示すデータにするために、トレンドを除去した汀線位置について前の測量時期との値の差をとることで測量期間の間に生じた変化量として、図-2.5.7～図-2.5.9 に示す。これらの図では、データを時系列によって示しているが、値は前回測量に対する汀線の後退量もしくは前進量で時刻に対して独立している。ただし、これらのデータは測量期間の長さの違いを含んだものとなっている。測量期間で基準化していないのは、イベントによりもたらされた変化量である場合と変化が蓄積した結果の量である場合があるためである。

また、各図には、各海岸の範囲内にある波浪観測所の毎正時の観測値からエネルギーフラックスを算出して、時系列として示した。観測所は、静岡・清水海岸が久能波浪観測所、富士海岸が富士田子波浪観測所、浜松篠原海岸が竜洋波浪観測所である。エネルギーフラックス E_f は、観測所の毎正時のデータを用いて式 (2.5.1) から観測点の値として算出した。

$$E_f = \frac{1}{8} \rho g H_{1/3}^2 C_g \quad \dots \dots \dots (2.5.1)$$

ここで、 ρ ：海水の密度($=1.03 \times 10^3 \text{kg/m}^3$)、 g ：重力加速度(m/s^2)、 $H_{1/3}$ ：観測統計値の有義波高(m)、 C_g ：群速度(m/s)である。

E_f の時系列データから前の測量時期との間について合計して、欠測がない観測日数で 1 日当たりに平均化したものを期間日当たりエネルギーフラックス (day_aveEf) とした。ただし、期間に対して 10%を超える欠測数があった場合には、期間全体を欠測扱いとした。

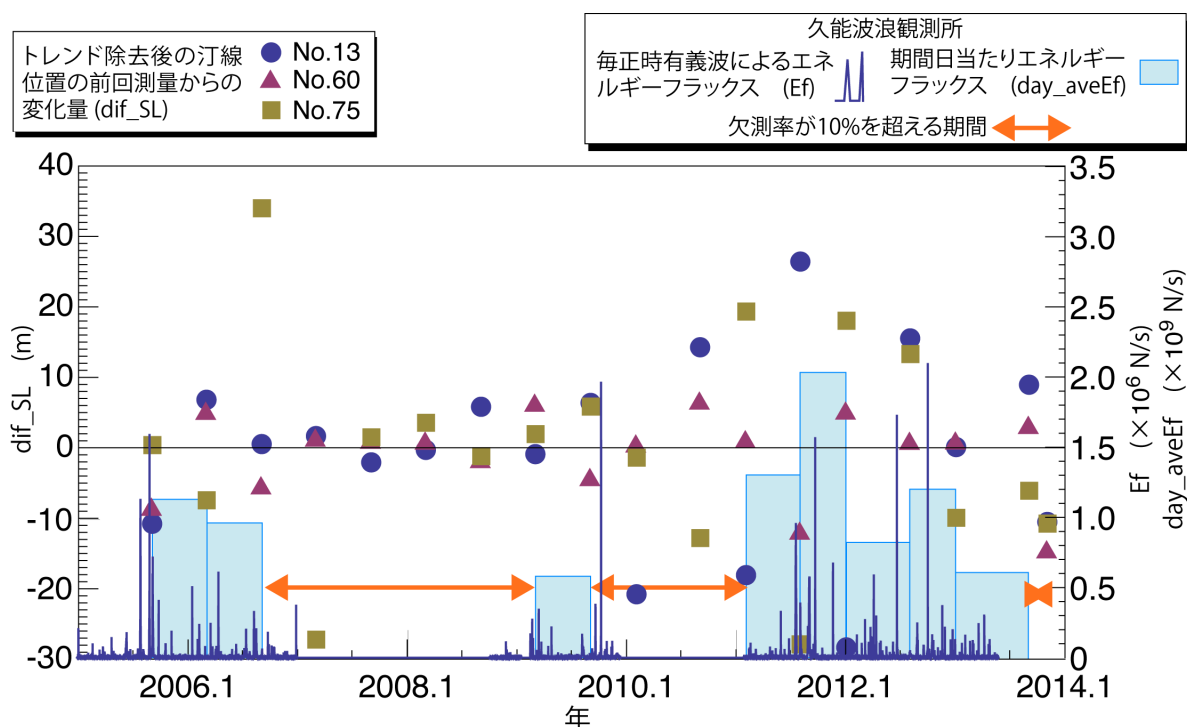


図-2.5.7 静岡・清水海岸の汀線位置変化量と来襲波のエネルギーフラックス

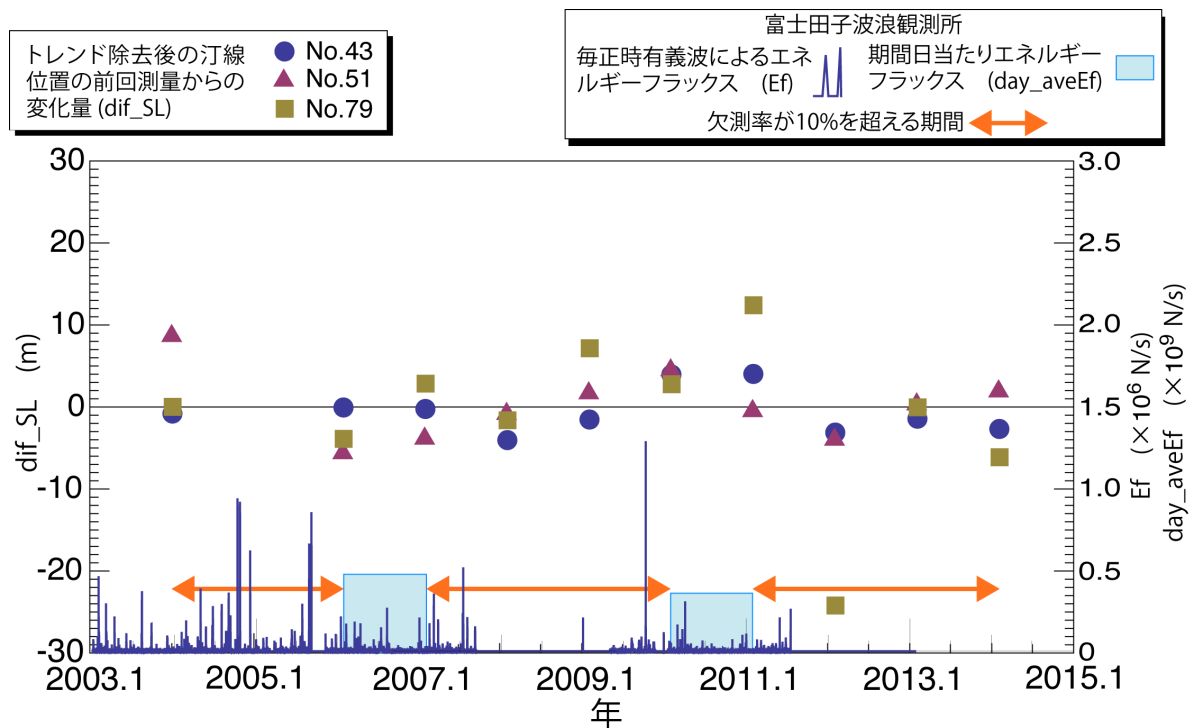


図-2.5.8 富士海岸の汀線位置変化量と来襲波のエネルギーフラックス

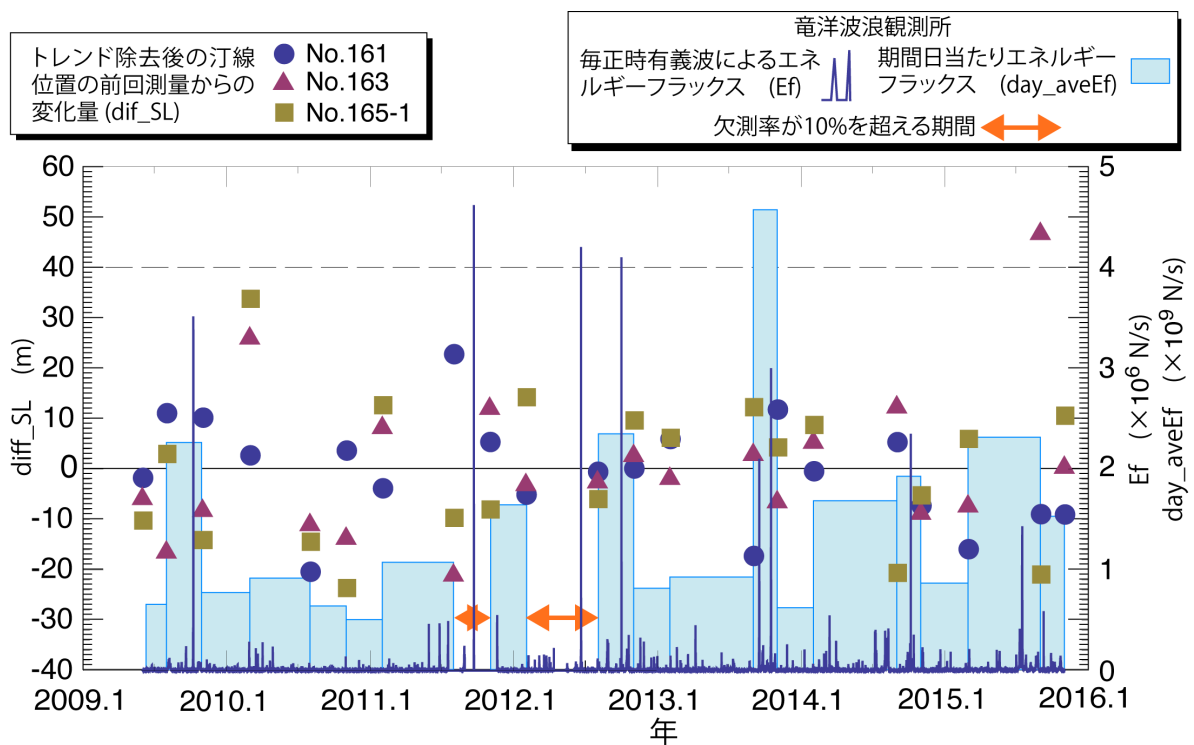


図-2.5.9 浜松篠原海岸の汀線位置変化量と来襲波のエネルギーフラックス

変動幅は静岡・清水海岸では概ね±35m の範囲、富士海岸では前進が概ね+15m で後退が-25m の範囲、浜松篠原海岸では前進が概ね+40m（離岸堤区間の No.163 で生じた特異な堆積を除く）で後退が-25m の範囲に収まっている。必ずしも砂成分が多い海岸で後退量が大きくないことがわかる。先のトレンド成分の傾きに対して、汀線位置の変化量がイベントにより前進、後退する量となり、砂浜の管理においては後退量が管理汀線の設定の参考となる。

外力との関係を見ると、全体として期間日当たりエネルギーフラックスの棒の面積が大きいほど汀線の変化量の幅が大きくなっているように見える。

2.5.2. 汀線位置の変化量と外力の対応性

汀線位置の変化量と外力の関係から養浜との関係で見た海岸の状態の違いを見ることを試みる。外力に対して各測線の応答が砂礫の堆積状況に応じて異なって現れれば、外力の大小に対して直接的な耐波侵食性を議論可能となる。試算のため、測量頻度が高い浜松篠原海岸のみ実施した。

はじめに横軸に測量期間の間に来襲した波のエネルギーフラックス(E_f)の最大値をとり、縦軸に汀線位置の変化量をとったものを図-2.5.10 に示した。最大値を取ることで高波浪イベントが汀線位置を決定するかを評価していることになるが、図から傾向を見出すことはできない。

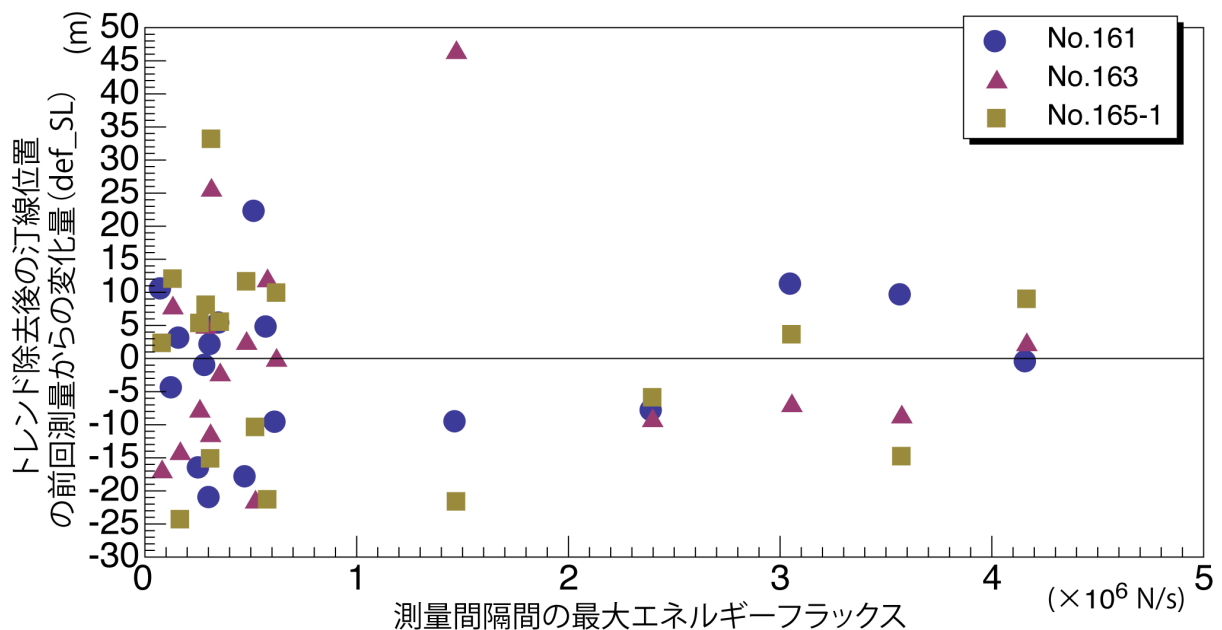


図-2.5.10 浜松篠原海岸の波の最大エネルギーフラックスと汀線位置変化量

次に、時系列で示した測量期間の間のエネルギーフラックスの合計値を欠測がない観測日数から 1 日当たり平均化した期間日当たりエネルギーフラックス (day_aveEf) を横軸にとり、これに対応させて汀線位置変化量を期間日数で割ったものを縦軸とした図を図-2.5.11 に示す。この図からは、前図と同様に特に傾向を見出すことはできない。

測量毎の間の期間に来襲した波の作用結果の集積結果であるとして、図-2.5.11 の割り戻す前の値で示したのが図-2.5.12 である。

これら 3 つの図から観測値からの波のエネルギーフラックスと汀線位置変化量の間で関係を見出すことはできなかった．これは，現象として両者に関係がないのではなく，測定の時間間隔と地形変化が生じる時間スケールに隔たりがあることや他の要因も加わっていることも原因と考えられる．

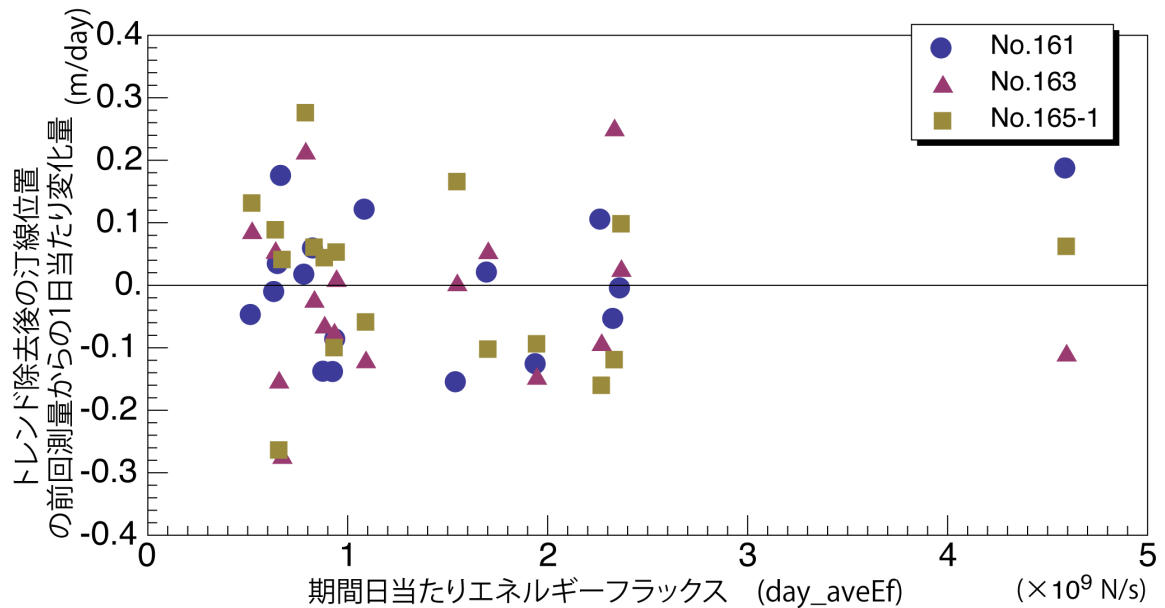


図-2.5.11 浜松篠原海岸の測量期間の日当たりエネルギーフラックスと汀線位置の日当たり変化量

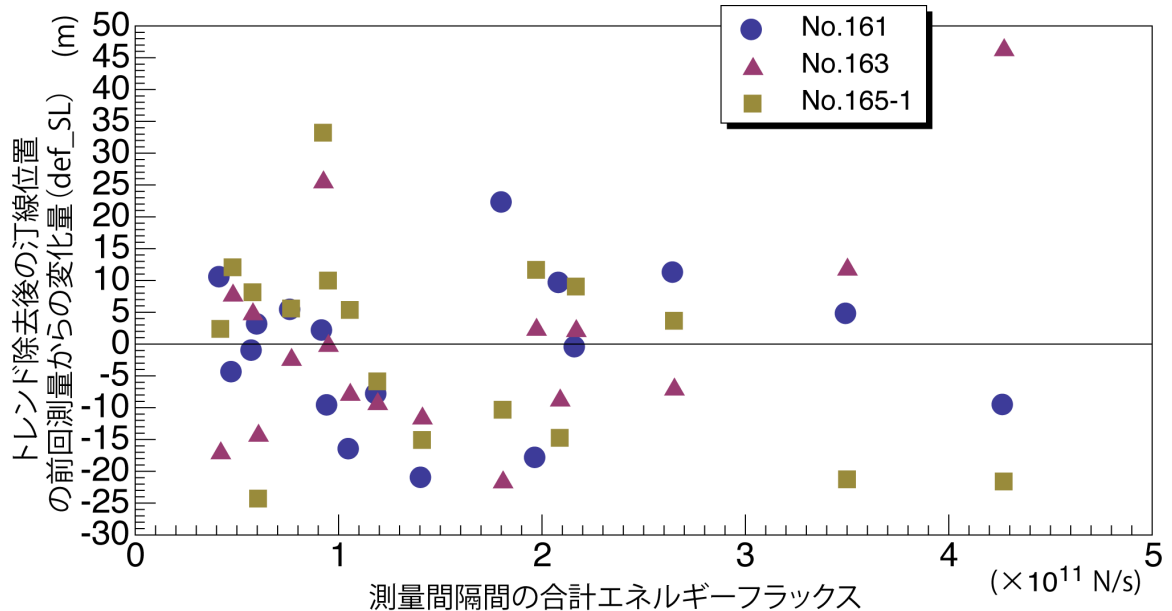


図-2.5.12 浜松篠原海岸の測量期間毎の合計エネルギーフラックスと汀線位置変化量

次に，断面形状の変化における侵食を示す堀川・砂村の C 値（堀川ら，1975）を用いることで横軸を変化傾向のポテンシャルとして示したのが図-2.5.13 である．算定に必要となる変化前の海底勾配は，変化量データが算出

された 2 つの測量時期の始まりの時点の汀線付近の勾配とした．波高と周期は，その期間に観測された竜洋観測所の波高と周期からエネルギー平均波を求めて適用した．粒径は 0.85mm の一定値とした．

堀川・砂村の C 値は，値が大きいほど侵食となる指標である．図では，データのプロットはばらつきが大きく，定まった傾向が見られない． C 値算定において，代表値で一定としている粒径を変化させたり，海底勾配の取り方を変えることで変化すると考えられる．しかし，3 つの測線のデータの分布状態から対策の有無による効果を解釈することは困難であり，本研究での用途には使えない．

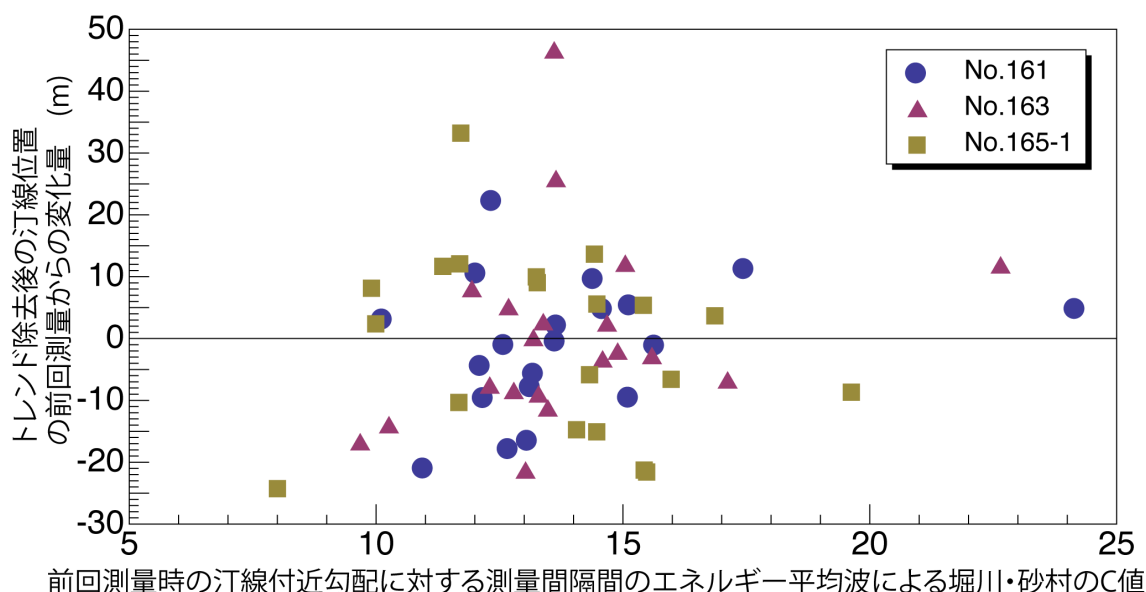


図-2.5.13 浜松篠原海岸の堀川・砂村の C 値と汀線位置変化量

2.5.3. 砂を多く含む測線との対応付けによる耐波侵食性の評価

海岸の底質や堆積の特徴による耐波侵食性の違いを見るために，一連の海岸で外力に対する変化が最も天然海岸に近い測線の変化量を侵食の指標として選び，他の測線の測量時期が同じデータと組み合わせた．3 つの測線が最も離れている静岡海岸 No.75 と清水海岸 No.13 で約 16km であるので来襲する波浪に大きな違いはないと考えられる．ただし，海底勾配や海岸線方向が異なることにより，変化の感度に違いが出る可能性を念頭に置く必要がある．

指標として横軸 (x) に取る測線は，表-2.5.1 で太枠で囲んだ測線で，静岡・清水海岸は砂成分が多く漂砂源である安倍川河口の左岸の No.75，富士海岸も同様に砂成分が多く漂砂源である富士川河口の左岸の No.51，浜松篠原海岸は養浜材料がほとんど到達しておらず砂成分が多い 3 号離岸堤の下手の No.165-1 とした．

図-2.5.14～図-2.5.16 に比較結果を示す．緑色の実線は $y=x$ で，ペアの測線の変化が同等なら，直線の近傍に分布する．しかし，縦軸側が養浜や離岸堤間，漂砂末端など異なる漂砂環境であるため，応答に幅が出ている．

$y=x$ よりも上側にプロットがある場合には， y 軸側にとった測線の方が汀線

後退の抑止に対して効果がより大きく有利であることになる。さらに、橙色の線では x 軸側が正の場合には y 軸側が侵食しなければ悪化しない状態として良しとして拡張した場合である。また、 $y = -x$ の直線を一点鎖線で示した。

3つの海岸に共通している点として、 x 軸方向が 0 に向かい小さくなると y 軸方向の値の絶対値の包絡線も 0 に向かい小さくなっている。これは、 x 軸にとった海岸の 3 測線のうち侵食状況の基準にした測線の地形変化が小さくなると、他の測線でも地形変化が小さくなることを示している。この特性は、トレンドとイベントの分離が成功していることを他測線との組み合わせにより相互確認していることになる。

図-2.5.14 は、静岡・清水海岸について示したものである。表-2.5.2 にトレンチ調査から得られた各測線の堆積状況の特徴を簡単に示した。No.13 はサンドリサイクルの区間で採取地点側にあり、No.60 は離岸堤を挟んだ上手側での養浜投入であることから、この 2 測線では著しく海岸の特性を変化させる対策が行われていない。このために、対策の差による変化量の差よりもそれぞれの地先がもともと有する特性が現れている。安倍川の土砂供給による効果が現れていない No.60 では、変化量も小さくなっており、汀線を前進させる余力が無いことを示している。

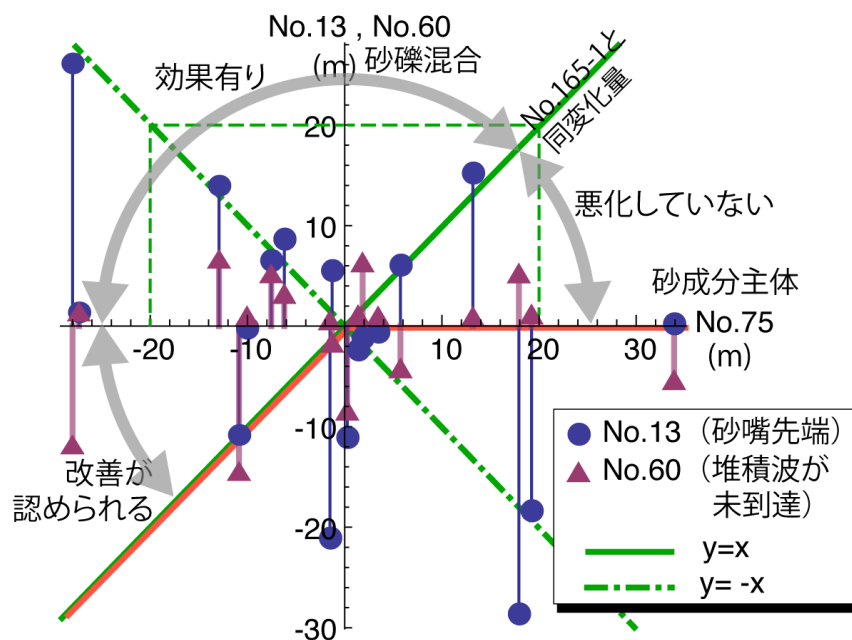


図-2.5.14 静岡・清水海岸の短期間の汀線位置変化量の測線間比較

表-2.5.2 各測線の堆積状況の特徴

測線番号 (地先名)	トレンチ露出面の観察による堆積状況
No.13 (三保飛行場前)	多彩な互層。砂のみの層は少ない。
No.60 (駒越南町)	多くの薄い層より構成、全体として砂が少ない
No.71 (中島)	全体として砂が主体。

富士海岸について、図-2.5.15 に示す。表-2.5.3 にトレンチ調査から得られた各測線の堆積状況の特徴を簡単に示した。養浜材が表面を覆う No.43 と消波堤で挟まれている No.51 を No.79 との組み合わせを通じて対比した。No.43 が積極的な海浜回復対策でありと No.51 は保護的な対策と言えるが、イベントに対する応答性は、両者で大きな差がないと言える。No.43 は、図-2.3.3 で示したようにこの期間では汀線が前進しているが、礫ばかりの養浜では No.79 が堆積を示す時に十分な汀線の前進が見られず、海浜の耐波侵食性に改善の余地があることがわかる。砂成分の付加により改善されると考えられる。

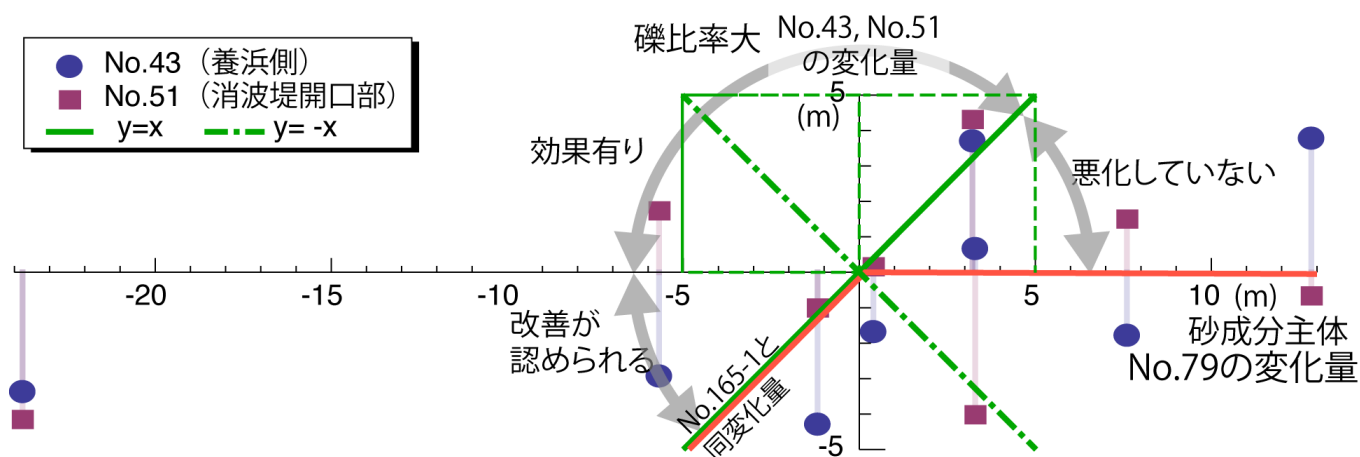


図-2.5.15 富士海岸の短期間の汀線位置変化量の測線間比較

表-2.5.3 各測線の堆積状況の特徴

測線番号 (地先名)	トレンチ露出面の観察による堆積状況
No.43 (東柏原新田)	上層は礫 (養浜材)。下層は砂主体。
No.51 (檜新田)	消波堤に囲まれており、砂の層と細礫の層が薄い厚さで多数の互層
No.71 (三四軒屋)	全体として砂が主体、礫のみの層がない

浜松篠原海岸について、図-2.5.16 に示した。また、表-2.5.4 にトレンチ調査から得られた各測線の堆積状況の特徴を簡単に示した。ここでは No.165-1 を x 軸側を選定している。No.165-1 は、養浜材の礫が未だに到達しておらずほぼ元来の砂浜海岸と同様な地形変化を生じると考えられる。そこで、No.165-1 との比較により対策の効果を見ることにした。No.161 と No.163 のどちらも多くのプロットが緑線および橙線より上にあり、礫を含んだ混合養浜により砂に礫の効果が加わったために、砂主体である No.165-1 よりも耐波侵食性が向上したと言える。また、No.161 (養浜盛土側) の方が、No.163 (離岸堤間) より耐波侵食性に有利で、バランス良い粒度で供給が続くことが重要であると言える。

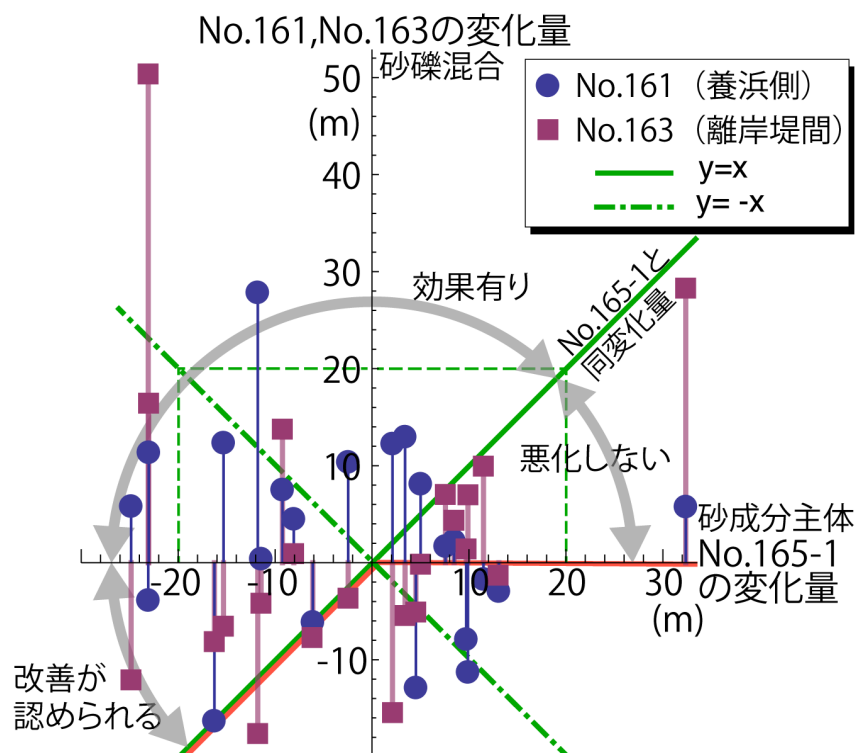


図-2.5.16 浜松篠原海岸の短期間の汀線位置変化量の測線間比較

表-2.5.4 各測線の堆積状況の特徴

測線番号（位置特徴）	トレンチ露出面の観察による堆積状況
No.161（養浜盛土側）	礫が存在する明瞭な層理面がある。 養浜により砂礫混合
No.163（離岸堤間）	養浜により砂礫混合 離岸堤に囲まれた後には礫も堆積（岸側下層）。 最近の堆積は砂主体（海側）で、表層に礫。
No.165-1（離岸堤群漂砂下手）	養浜材料がほとんど到達していないため、全体として砂成分が主体。 礫のみの層がない

以上、3 海岸で、砂成分主体の測線と海岸特性が異なる地点との比較を行った。海岸毎に測量の期間や頻度が異なることやトレンチの箇所間の距離も異なるにもかかわらず、同じ手法により同様な結果を得ることができた。

2.6. 海岸トレンチ調査のまとめ

砂と礫が混在する海浜において、砂成分と礫成分が果たす役割を解明するために、3 漂砂系（静岡・清水海岸、富士海岸、遠州灘沿岸）6 地先でトレンチを掘削し堆積構造を調べた。主な結果は次のとおりである。

- 1) 海浜での ^{14}C による年代の推定は木質系のサンプルの取得が少なく困難であるため、通常のボーリング等を用いた地質調査での年代測定では堆積の状態を把握することは不可能である。したがって、本研究で構築した、砂礫混合海浜の形成過程を解明するために、砂礫の打ち上がりから遡上限界までを連続して把握するトレンチ調査手法が有効である。
- 2) この砂礫混合海浜の形成過程を解明するためのトレンチ調査手法を、初めて実施し、掘削面に層理面として残された地表面と測量結果や外力との整合解析から堆積過程を推定した。
- 3) トレンチ掘削により露出した層理面と定期海浜断面測量は、概ねよく一致した。このことから、測量が実施されている期間であれば形成時期を推定することができることが示された。
- 4) 清水海岸駒越南町や富士海岸吉原消波堤の開口部等の陸側への砂成分の供給が少ない海岸は、厚みを持った堆積層が見られなかった。また、前浜の高さも低くなっている。一方で、砂成分を多く有する海岸では砂や砂と礫が混合した厚い堆積層を有しており、層が厚い堆積層を形成するためには砂の割合が高い必要があると推察される。
- 5) 掘削面から堆積状態を概ね7つに分類できた。
- 6) 堆積構造を形成する際には流れの方向に沿う指向性を有して堆積する等、礫一つ一つの形状も重要な要素となっている。
- 7) 扁平な礫は波とともに遡上して、遡上水流中を滑走することで陸側奥まで到達する。また、球形の礫が集積している層は、掘削時にすぐに崩れてしまい安定性が悪い。
- 8) 武田・砂村のバーム形成条件と推定バーム高さを粒度別に時系列で重ね合わせて比較することで、礫混じり層や礫の散乱を及ぼした気象擾乱を特定できた。
- 9) バームは礫により汀線付近に形成されるが、表層地形で見られる山型は掘削面ではほとんど確認できない。掘削面に残された構造では海側が礫のみで形成されており、そこから陸側へ礫主体の層が伸びている場合が多い。このようになるメカニズムを、トレンチ調査と定期測量、海象観測結果から推定した。その結果、波高だけでなく潮位と周期の影響も大きいことが分かった。
- 10) トレンドを除去した汀線変動量から天然砂浜に近い測線との比較から海浜の耐波侵食性を評価することができた。その結果、砂と礫の両者の有利な効果を活用できる砂礫混合養浜が、耐波侵食性に対する効率を高めることが示された。

参考文献

堀川清司・砂村継夫・近藤浩右・岡田 滋 (1975) : 波による二次元汀線変化に関する一考察, 第22回海岸工学講演会論文集, pp.329-334.

3. 養浜による前浜地形の耐波侵食性向上に関する水理模型実験

3.1. 実験の目的

3つの海岸でのトレンチ調査により、漂砂環境や外力条件による堆積層の違いを調べた。その結果、厚い堆積層を形成するためには砂の割合が高い必要があること、礫の堆積構造には礫一つ一つの形状の違いが関係していること、表層の微地形であるバームの特徴の山型が堆積層で見られることは少ないこと、砂と礫の混合養浜が耐波侵食性を高めることが可能であることを示した。そこで、現地で見られた耐波侵食性が高まり堆積層を厚く岸沖に広い海浜を形成する礫と砂の相互作用による堆積過程のメカニズムの解明と耐波侵食性向上を有する養浜盛土の構造を検討するために、養浜基本材料として砂と細礫、中礫から構成される養浜盛土に波を作用させる水理模型実験により耐波侵食性を検証した。

養浜は汀線付近への盛土工という形での投入が完了すると、盛土はいつか波による侵食を受けるが、それは浜を養うという目的達成のための過程でもある。しかし、盛土の侵食は損失、汀線の前進は効果として受け止められる。つまり、両者は一体的な関係にあるので、養浜盛土から汀線までの範囲を「前浜地形」として一括して評価する必要がある。そこで、耐波侵食性を、盛土および形成された陸部の面積、静水面下の堆積断面積を解析して、養浜盛土の持久性から盛土断面積の減少が緩やかである「盛土侵食」、汀線が盛土からの供給が汀線の維持や前進に寄与して後退しないこととする「汀線後退」、堆積性の波に変化したときに水中にストックされた砂礫が波により陸側の堆積に寄与する「回復性」の地形変化メカニズムと、一般的な実現性の観点から「経済性」を加えて4点から評価した。

3.2. 実験方法

実験は、国土技術政策総合研究所の長さ33 m、幅0.3 m、深さ0.8 mの小型造波水路を用いて図-3.2.1に示すように1/10勾配のモルタル製固定床を設置しその陸部分に養浜盛土を整形した。もとの海岸地形（原地形）を移動床として変形を許した場合には、作用させる波に応じた断面形状の変形が生じることや、設置された養浜材と原地形の材料が混合してしまう。本研究においては、養浜材の移動の把握が目的のため、このような状況は減少の把握に支障となる。そこで養浜材料と原地形の相互間の地形変化への影響を排除するとともに、全てのケースで同一の条件で比較するために固定床とした。このため、碎波により生じるトラフが形成されないことに留意する必要がある。

養浜の盛土に用いた材料は、盛土の崩壊や礫の移動の性質に材料の形状が重要となると考えられることから、海岸近傍の河道内で採取された玉砂利および砂とし、図-3.2.2に示すように粒度分布が重ならない3つの粒度調整となるようにふるい分け済みの材料を用いた。中礫を材料a、細礫を材料b、砂を材料cとする。

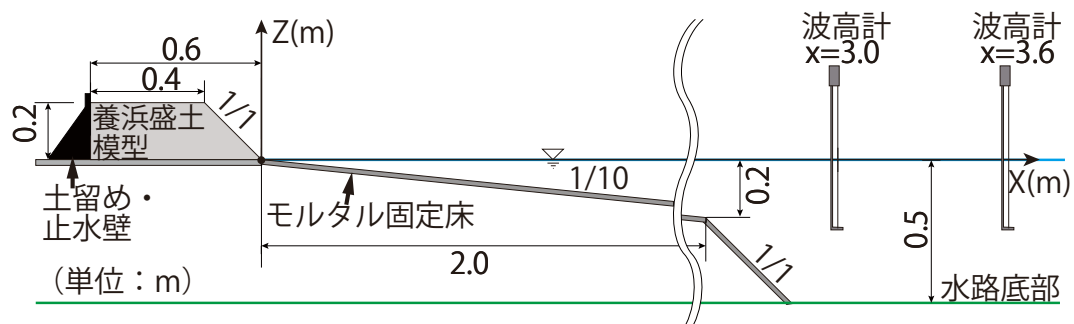


図-3.2.1 実験模型と計測器位置

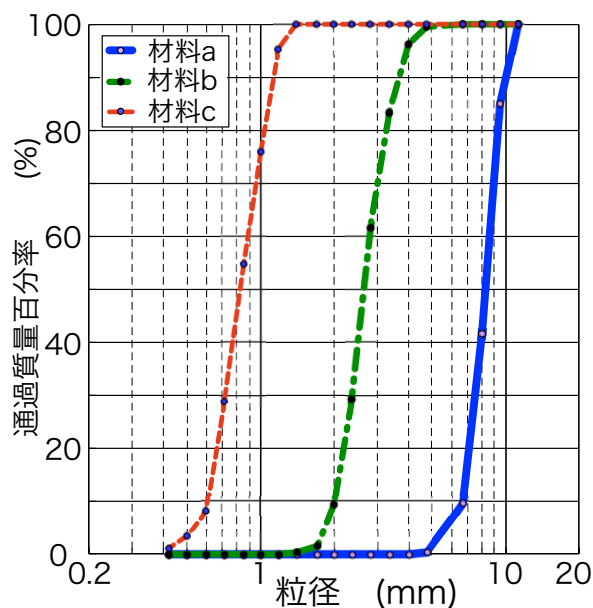


図-3.2.2 材料の粒度分布

水路内沖側に 2 本の容量線式波高計を設置して入射波とともに反射率を測定した。波浪条件は、表-3.2.1 に示す 2 種類の規則波とした。波浪条件は、実験材料の中央粒径から堀川・砂村の C 値（堀川ら，1974）が異なるように設定した。ただし，装置の性能から堀川・砂村の海浜変形タイプが大きく異なる条件は実施できなかった。

表-3.2.1 波浪条件と堀川・砂村の地形変化タイプ

	波浪条件		養浜材料	d50 (mm)	堀川・砂村	
	波高(m)	周期(s)			C 値	地形変化
波1	0.1	1.3	材料a	8.2	1.0	Ⅲ
			材料b	2.3	2.3	Ⅲ
			材料c	0.82	4.6	Ⅱ
波2	0.06	2.6	材料a	8.2	0.4	Ⅲ
			材料b	2.3	0.9	Ⅲ
			材料c	0.82	1.7	Ⅲ

この実験は、養浜盛土を含めた前浜地形の変化過程を見ることに主眼をおいた基礎実験であり、特定の海岸を対象とした模型実験ではない。しかしながら、第2章で述べたトレンチ調査との対比を念頭においたため、縮尺を 1/4～1/8 程度に想定して、波や底質の条件を決定した。水路の制約から、沖波としてはやや小さめの条件しか設定できなかったものの、養浜盛土の侵食や、汀線部における海浜の回復など、現地で観察される前浜部の堆積構造の形成過程を再現することができた。

実験ケースは、養浜盛土を構成する材料の組み合わせにより設定した。材料としては、中礫の材料 a、細礫の材料 b、砂の材料 c を基本材料として、材料 a と b を混合した材料 d、材料 a と b、c を混合した材料 e を作成した。養浜盛土は、図-3.2.3 に示すように、これらの基本材料単独の 3 ケースとこれらを混合した 2 ケース、砂の間に礫層を設けた盛土構造として 3 ケースの計 8 ケースとした。各ケースに含まれる基本材料は、表-3.2.2 に示す割合（体積比）とした。混合材料の case4～8 で最も砂（材料 c）の割合が多いのが case8 の 73.3 %で、中礫（材料 a）の割合が多いのが case4 の 50 %となっている。

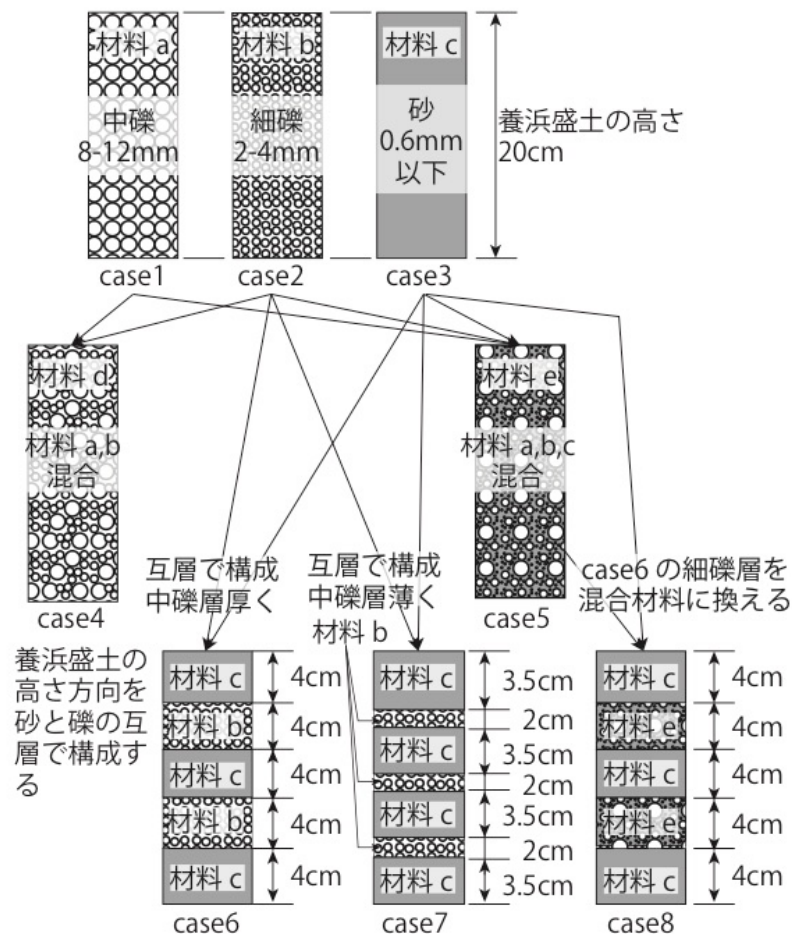


図-3.2.3 養浜盛土の構成と case

表-3.2.2 養浜盛土の材料構成

養浜盛土に含まれる割合	実験ケース番号							
	1	2	3	4	5	6	7	8
材料 a (中礫)	100%			50%	33.3%			13.3%
材料 b (細礫)		100%		50%	33.3%	40%	30%	13.3%
材料 c (砂)			100%		33.3%	60%	70%	73.3%

各ケースでは、初めに **C** 値が大きい波 1 を作用させ、40 分を目安として海浜変形の進行が小さくなった時点で停止したのちに、波 2 を作用させた。水路側面のガラス観測面から高速度カメラにより毎秒 120 コマで撮影し、5 分ごとに盛土の侵食状況と固定床上の堆積状況をトレースした。

3.3. 養浜盛土の侵食と固定床上の堆積の推移

ケース毎、波毎（上図が波 1，下図が波 2）に図-3.3.1～図-3.3.8 に示す。図には、侵食と堆積の表面をトレースした時刻の近傍で、砕波の様子をトレースしたものを細線の同色で示した。

図-3.3.1 の case1 は、中礫のみで構成した盛土のケースである。盛土はほとんど侵食されていない。波 1（上図）からわかるように、砕波の先端が突っ込んだ後（20～50m 付近）に多く堆積している。波 2 では、当初に水中の堆砂地形が均されるように変化したものの大きな変状が生じなかった。そこで、沖側へ供給されることで状況が変化することを目論んで、15 分後に侵食面をほぼ平行に切り込み、汀線から沖側 20 cm までをステップ地形に形成した。しかし、ステップが変形することはなく、盛土基部が若干侵食されるのみで、人為的に盛土を切り込んだ以外には、大きく変化しなかった。

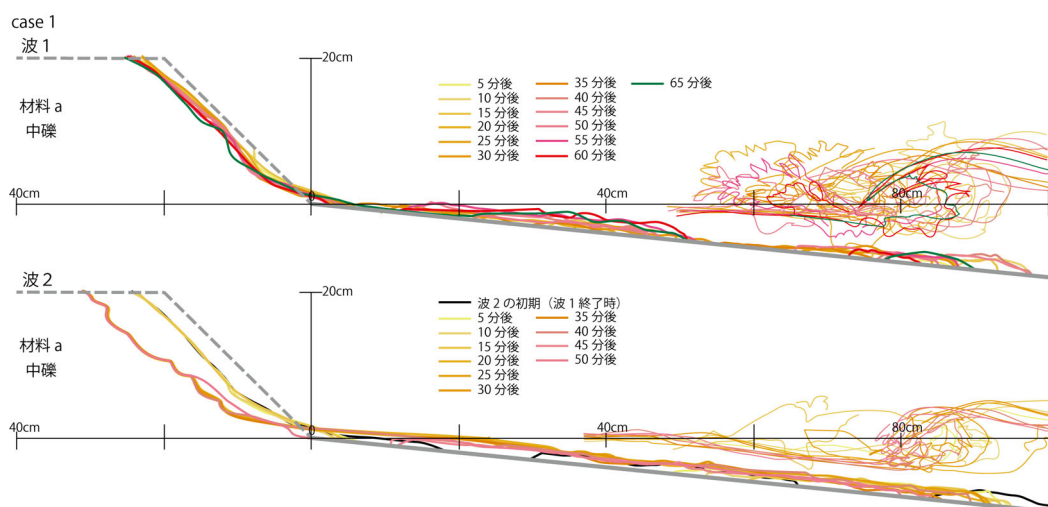


図-3.3.1 case1 の侵食・堆積の変化

case2 について、図-3.3.2 に示す。このケースは、細礫のみで構成した盛土のケースである。粒径が小さくなったため、波 1 における盛土の侵食が増加した。この増加分は沖側 50cm 付近までと砕波点付近に堆積して、遡上波が盛土をそれ以上侵食しない安定地形を形成したと考えられる。波 2 は周期が大きいいため、遡上高も大きくなり盛土の侵食が進んだ。侵食された礫は砕波点付近の 90cm～130cm 付近に堆積している。

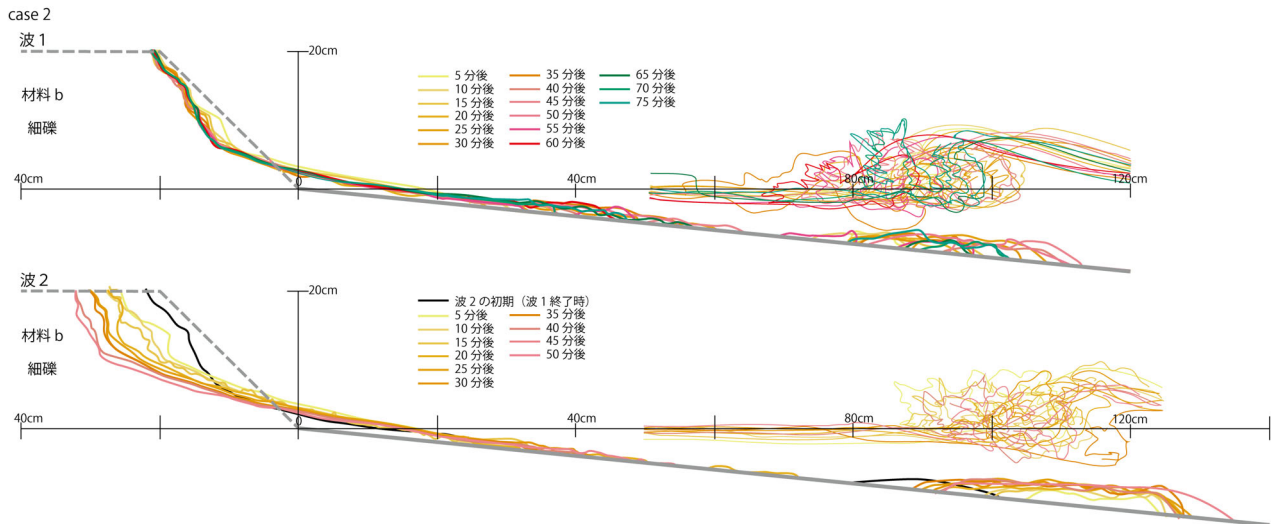


図-3.3.2 case2 の侵食・堆積の変化

case3 について、図-3.3.3 に示す。このケースは、砂のみで構成した盛土のケースである。波 1 でも波 2 でも早期に侵食が一気に進行してその後の変化は小さくなる。波 1 においては、砕波点付近に堆砂が生じて砕波の形状を尖鋭化させて手前で際はと先端の突っ込みを生じさせ、これにより減勢区間が沖に寄りそれにともない汀線が前進している。波 2 では、砕波点付近にあった堆砂は全て岸側へ擦り付けられるとともに、遡上により削られた盛土材料も全面に張り付き全体的に前進する。

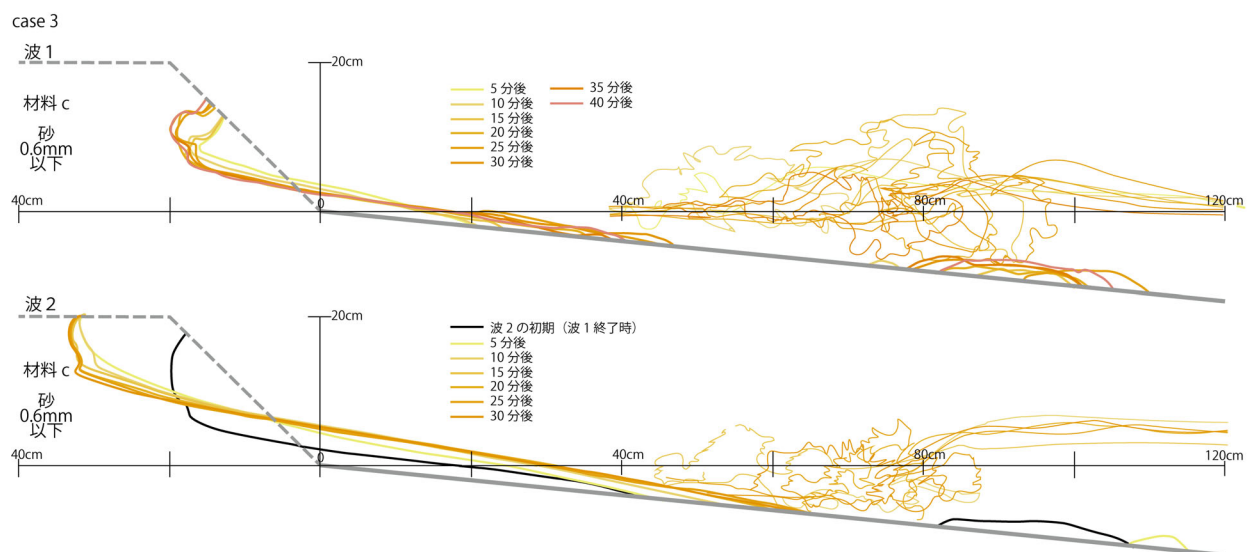


図-3.3.3 case3 の侵食・堆積の変化

case4 について、図-3.3.4 に示す。このケースは、中礫と細礫を同体積で混合した盛土のケースである。波 1 でも波 2 でも細礫のみで構成された case2 とほぼ同様な侵食・堆積の状況となっている。違いは波 2 において、汀線より陸側(20cm まで)の地形変化で、case2 では常に下に凸であるのに対して、case4 では侵食の後に堆積が生じて上に凸型の地形となっている。

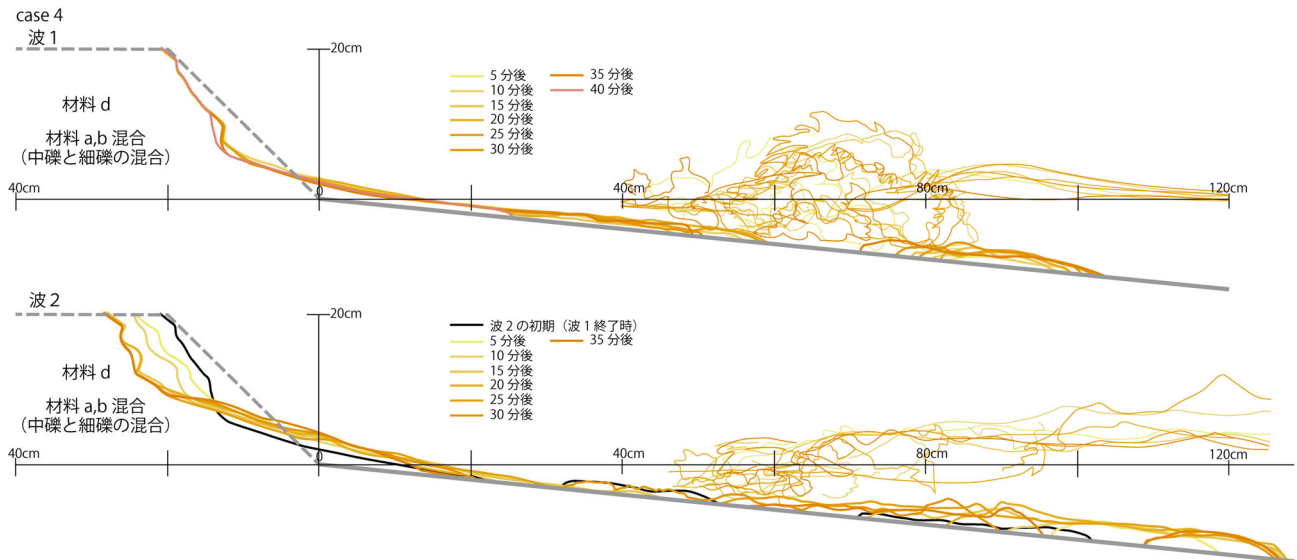


図-3.3.4 case4 の侵食・堆積の変化

case5 について、図-3.3.5 に示す。このケースは、中礫と細礫と砂を同体積で混合した盛土のケースである。質量比で同量にすると空隙率の関係から砂の砂粒量が少なくなるが、体積で揃えることで砂の量を多くしている。特に波 2 では、このケースだけで大規模なステップ地形の形成と前進が見られた。ステップ地形が形成されると盛土が侵食されなくなり、沖側の地形形成のための土砂の供給がなくなる。この地形は沖側の堆砂を条件としているため、前進した地形を侵食して補うが、これは岸側の堆砂を促すので、この過程を繰り返す堆積メカニズムの循環が生じる可能性がある。

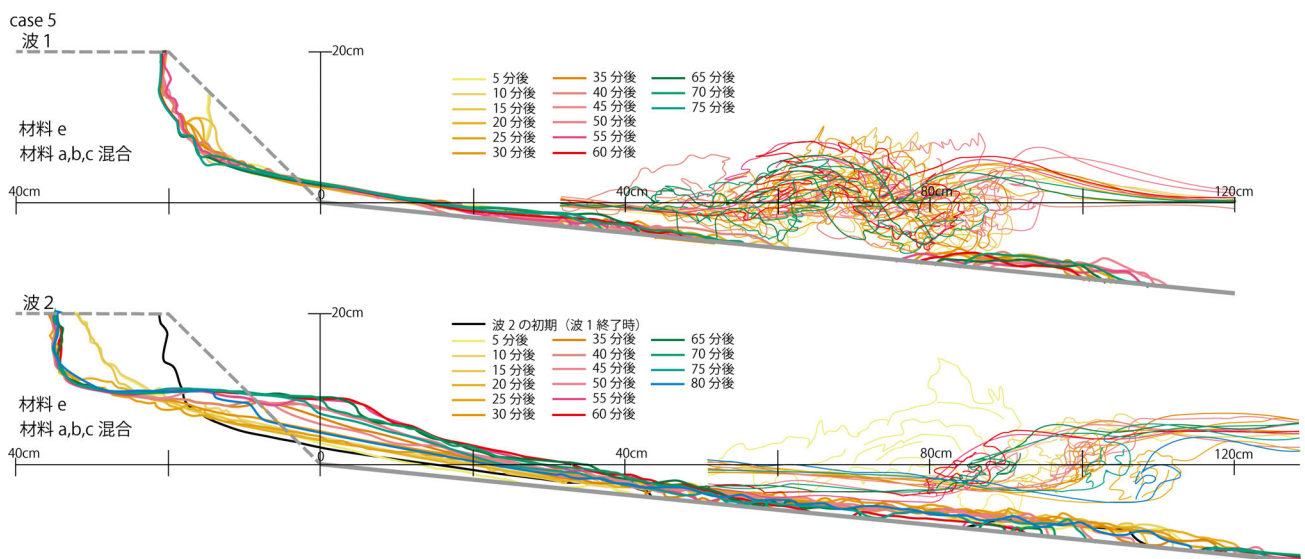


図-3.3.5 case5 の侵食・堆積の変化

case6～8 は、礫による盛土が崩れにくいことから砂の盛土に礫層を挿入して強化が可能かを確かめるため、礫層と砂層の互層としたケースで実験した。

case6 について、図-3.3.6 に示す。このケースは、中礫の層を砂層の間に誘うと同じ厚さで挿入した盛土のケースである。盛土の部分では、侵食の進行は侵食面の形状が平行移動するようになっていたが、切り立っては斜めになる様子が顕著に現われている。堆積では、波 1 でバームが 50 分後に形成され、波 2 ではバームは消滅して砕波位置まで切れ間なく固定床を覆う堆積となった。

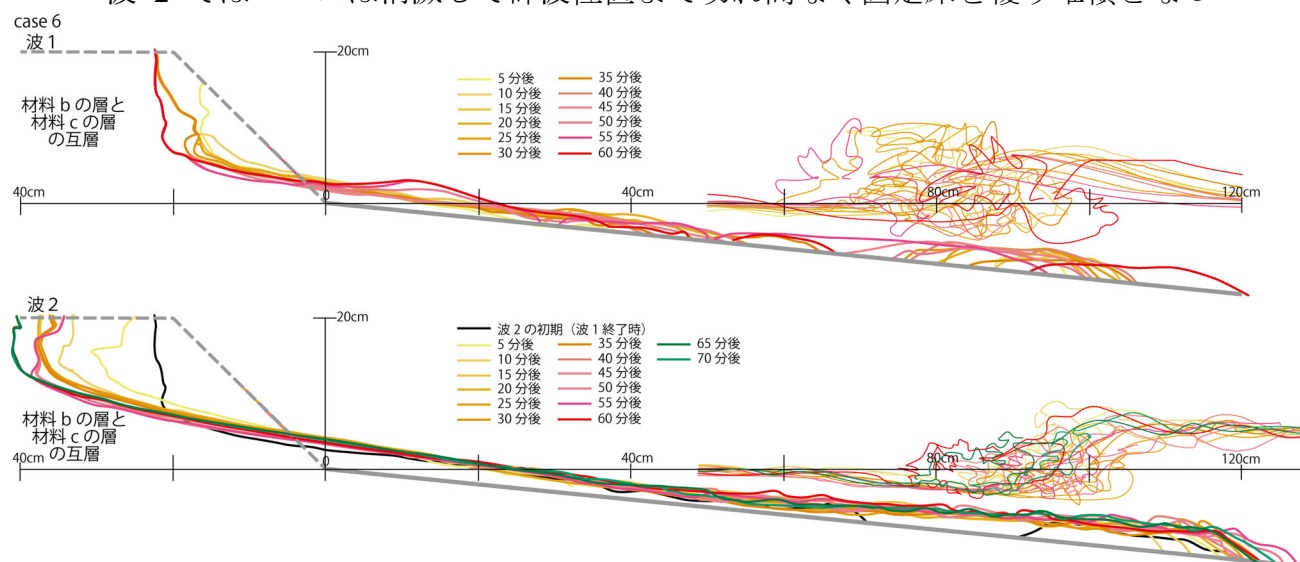


図-3.3.6 case6 の侵食・堆積の変化

case7 について、図-3.3.7 に示す。このケースは、case6 の中礫の層の厚さを小さくして本数を増やした盛土のケースである。case6 よりも砂成分の全体量は増えている。波 1 では 100 分後まで波を作用させたが、概ね他のケースと同様で盛土側 20cm 程度の後退で収まっている。しかし、5 分後以降に生じ 40 分まで見られるオーバーハングの奥行きは他のケースと比べて大きい。このケースでもバームは形成されているが、case6 が 50 分後であったのに対し

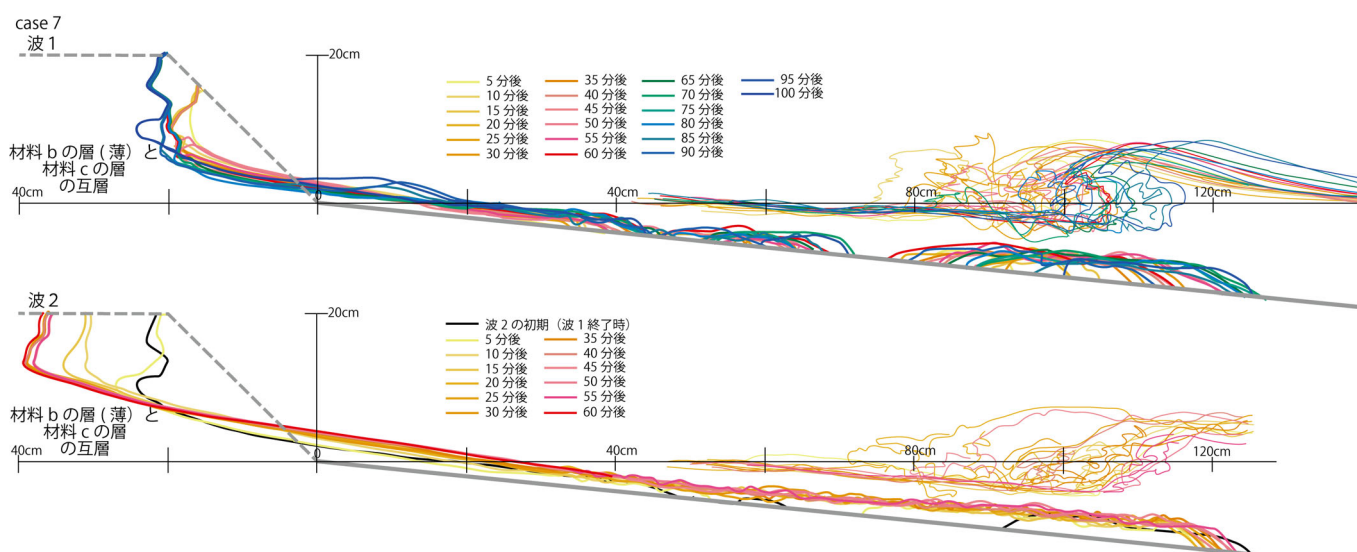


図-3.3.7 case7 の侵食・堆積の変化

て、case7 では 85 分後となっている。波 2 については、case6 とほぼ同様である。

case8 について、図-3.3.8 に示す。このケースは、case6 の中礫の層を中礫、細礫、砂の 3 種類を同堆積で混合したものに変えたケースである。砂と礫を混合した 4 ケース (case5~8) の中で最も砂成分が多いケースである。砂成分が多い case7 と 3% だけの差であるが、case8 は砂のみの case3 に近い侵食・堆積の状況となっている。波 2 で大きなオーバーハング状態と見える部分があるが、観測ガラス面に残ってしまった砂がトレースされてしまったものである。

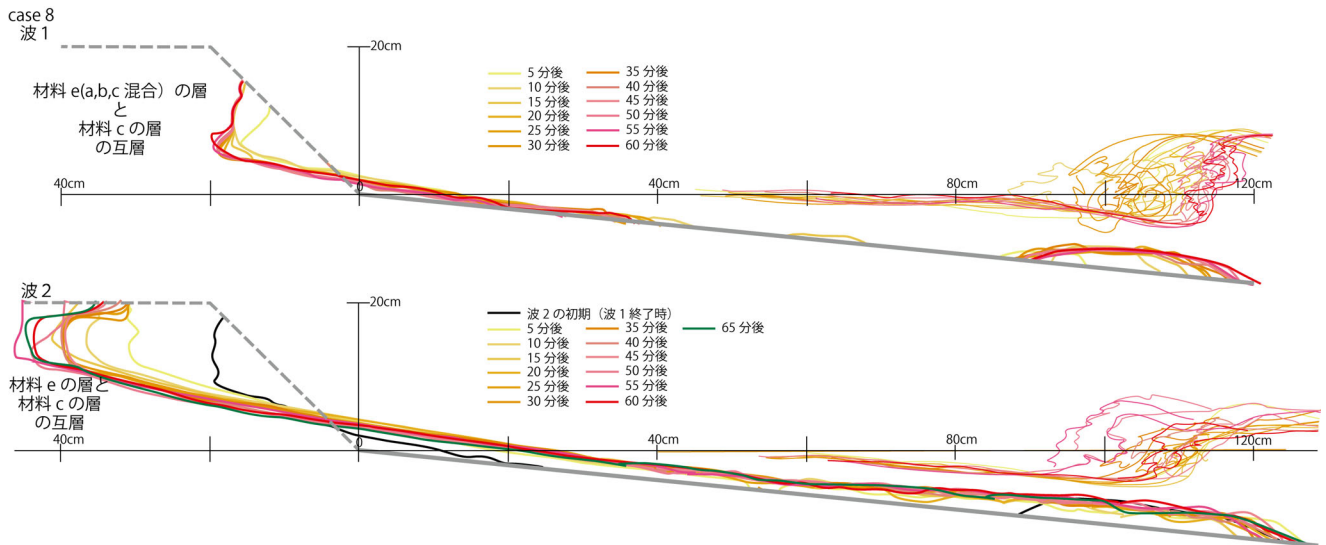


図-3.3.8 case8 の侵食・堆積の変化

case6~8 の礫層と砂層の互層としたケースでは、波が盛土に衝突して砂の部分が侵食するとその上の礫の層も同時に落下して戻り流れとともに洗い出されてしまう。このために砂だけで構成した場合よりも耐波侵食性が低くなる。遡上した高さより大きな範囲で崩れるために、オーバーハングを形成しやすくなる。現地でこのような砂と礫の互層構造となっている場合には安全に気をつける必要がある。

波 1 において、バームが形成されたのは case6 と case7 であった。また、波 2 において、ステップ形成と前進ともなう汀線の前進が生じたのは case5 のみであった。

3.4. 養浜盛土の耐波侵食性

トレースした断面形状を図-3.4.1 に示すように養浜盛土の侵食断面積を S_e 、遡上区間の盛土の断面積を S_{sa} 、汀線から最大遡上高の間で静水位より上もしくは盛土の初期形状より上の断面積を S_d 、静水位以下に堆積した部分 S_{uw} に分けて、測定した。

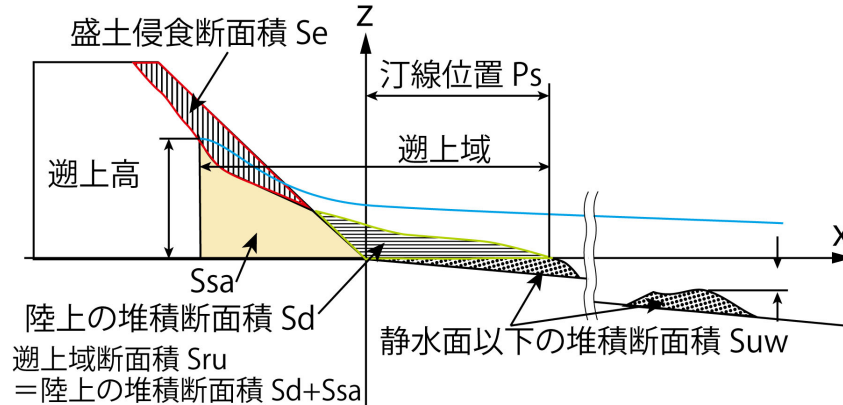


図-3.4.1 断面面積の算出区分

養浜盛土が侵食されて元の形状から欠損した部分の断面積（図-3.4.1 の盛土侵食断面積 S_e ）の時系列を図-3.4.2 に示した。case1 の波 2 において、状況が変化しなくなったので、15 分後に水中の地形形成を促すためスコップで侵食面が平行となるように盛土を崩し均して汀線から沖側 20 cm までをステップ地形に形成したため、侵食断面積が不連続に急激に増加する時系列となっている。

波 1 における case6 の 60 分、case7 の 95 分、case8 の 60 分と波 2 における case5 の 25 分以降で侵食断面積が減少する。これは、侵食された材料が打ち上げられて堆積した砂礫の面積が含まれるためである。

各ケースの全体的な侵食断面積の増加の傾向を比較する。侵食断面積が小さい順に、波 1 では case1, 2, 4, 3, 8, 5, 7, 6, 波 2 では case1, 4, 2, 3, 5, 7, 6, 8 となっている。case1, 2, 4 は、波 1 と波 2 とともに侵食断面積が小さい。これらは砂を含まない礫のみの材料 a と材料 b により構成されている。それら以外は砂を主体としたケースであり、次に侵食され難いのは、砂単独の case3 と全種類が混ざっている case5 となっている。case5 は波 1 では case8 と拮抗しているが、波 2 では明らかに侵食され難くなっている。盛土構造を互層とした case6～8 は、砂単独の case3 よりも急速に侵食が進行するが、砂を多く含んでいることから時間に差はあるものの安定に向かい盛土の侵食が収束する。この時、前節で述べたように case6 で 50 分、case7 では 85 分にバームが形成されている。図-3.4.2 から、それ以降では侵食断面積が安定している。

礫のみで構成されるもの（case1 や 2, 4）は盛土の耐波侵食性が高い。case5 のように材料を幅広い粒度を包含ようにすると、波 2 の 25 分以降に見られるように侵食面積が減少し 砂だけの場合と同程度の侵食面積まで回復しているが、これは盛土の耐波侵食性よりも次節で述べる前浜の耐波侵食性から得られるものである。

また、波 1 で、造波開始から 15 分間ほどのケースにおいても急激な変化過程となっており、その後 30 分後までは安定している。波 2 では、造波開始から 15 分間は同様に急激な変化過程を示しているが、安定する期間がほとんど無く次の変化に移っている。

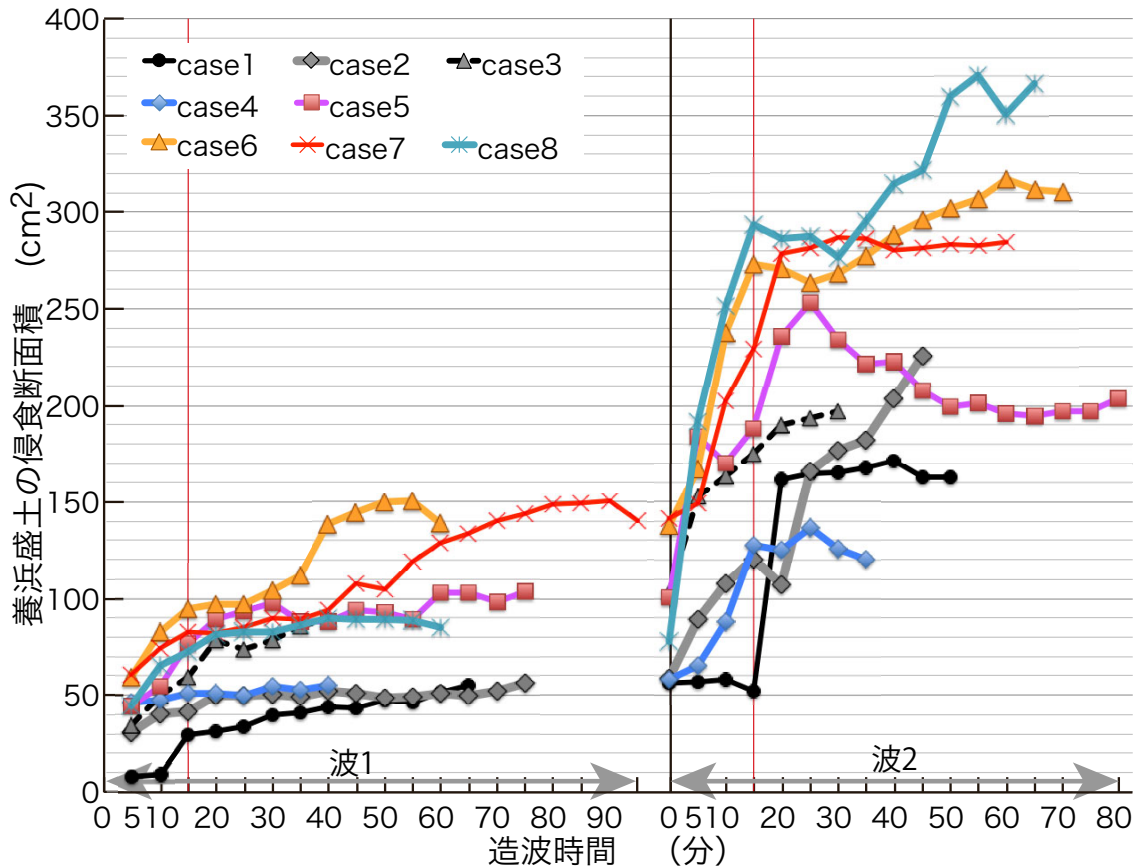


図-3.4.2 養浜盛土の侵食断面積(S_e)の時系列

3.5. 前浜地形の耐波侵食性

ここでは、汀線から盛土部分までを「前浜地形」として、養浜の効果を評価する。

3.5.1. 汀線位置の変化

図-3.5.1 (波 1) および図-3.5.2 (波 2) に海浜変形の状態を表す変数として、図-3.4.1 で定義した汀線位置(P_s)、汀線から最大遡上位置までの遡上域断面積(S_{ru})、 $x=0$ m から沖側の静水面以下で堆砂した部分を合計した断面積(S_{uw})について、時系列で示した。

図中最上段のグラフで汀線位置(P_s)の違いを比較する。図-3.4.2 で示したように波 1 の造波開始後 15 分から 30 分は安定している。そこで、波 1 の造波開始後 30 分での汀線の前進量を比較すると、中礫単独の case1 は 3.4 cm と小さく、砂単独の case3 は 17.7 cm と突出し、その他のケースは 14.0 cm を平均として 13.3 cm～15.4 cm の範囲に収まっている。

周期が長い波 2 においては、構成する主な粒度の違いによって、汀線の前進効果に明瞭な違いが現れた。つまり、礫を主体とする case1, 2, 4 は前進量が小さく、砂が主体となっている case3, 6, 7, 8 は前進量が多い。中礫と細礫、砂が同量ずつである case5 は、初めは礫主体のケースを下回るが後に上回る。

中礫のみで構成される case1 の汀線の前進効果は、波 1 と波 2 のどちらでも低い。case1 は、前述したように波 2 の 15 分から 20 分にかけて盛土を掘削してステップ地形に整形した。このステップによる沖出した分の汀線が前進したものの、60 分後には養浜盛土ののり先である $x=0$ cm を割り込んだ。このことから、たとえ礫の供給量を増やしたとしても汀線の前進効果は限定的と言える。

波 1 において、中礫のみの case1 は他と比べてほとんど汀線の前進が無く、細礫のみ case2 は当初は前進するが最終的には 3 種同量の case5 と同様の変化となる。波 1 では、汀線の前進量が、case2, case4, case5, case7 を中心としてより前進が case3 と case6 でやや少ないのが case8 となっている。波 2 においては、造波開始 30 分以降の順位から、case1, case2, case4 はいずれも汀線前進量が 20cm 未満で波 1 より前進したケースは無く、他の砂を含んだケー

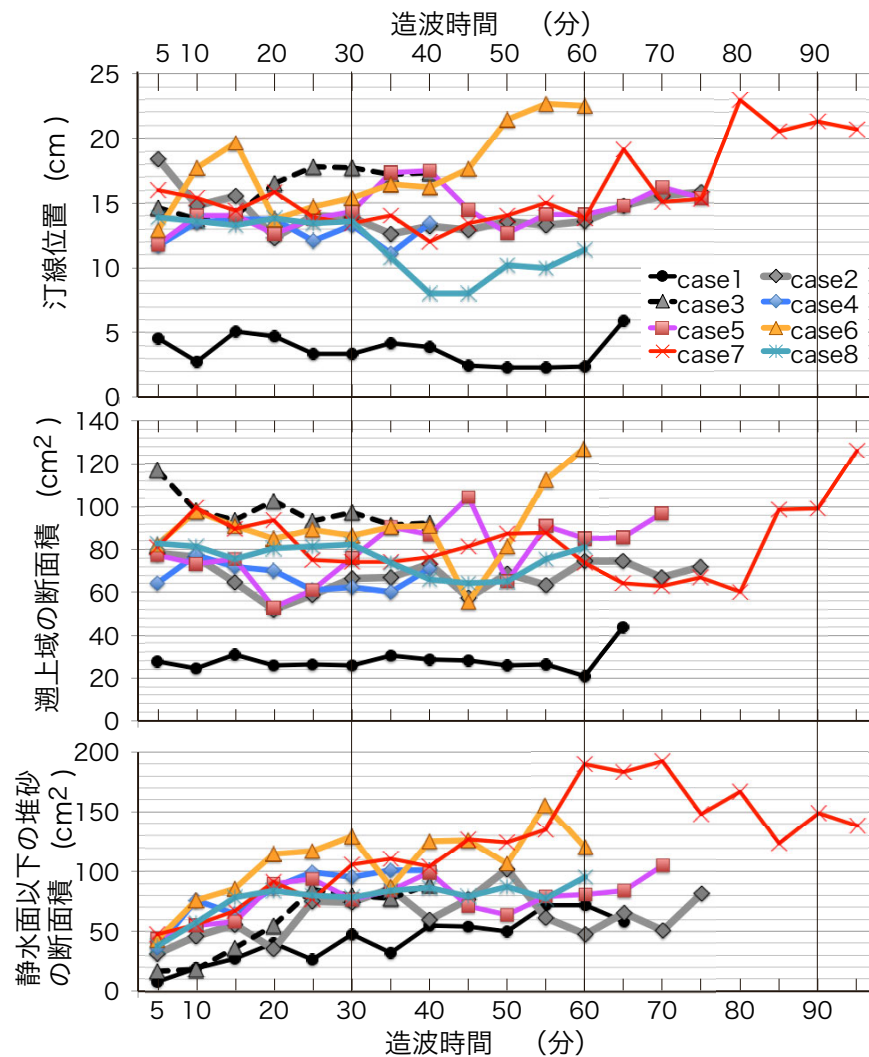


図-3.5.1 波 1 の汀線位置(P_s), 遡上域断面積(S_{ru}), 静水面以下の堆積断面積(S_{uw})

スは 20cm を越えて波 1 より同等以上に前進している．波 1 で劣勢であった case8 は，波 2 では他の砂礫混合と同様な程度まで前進している．よって，礫のみに比べて砂と礫を用いた材料の方が，汀線の前進に有利といえる．

3.5.2. 前浜地形とバー・ステップの断面積の変化

侵食された土砂と前浜地形の変化とバー・ステップの変化の関係をみるために，地形変化の推移を図-3.4.1 で示したように遡上域の断面積 S_{ru} （盛土範囲の遡上域の静水面から上の断面積 S_{sa} と汀線から沖側の静水面から上の断面積 S_d の和）と静水面より下の堆積断面積 S_{ud} に分けて算出した．図-3.5.1

（波 1）および図-3.5.2（波 2）の上から 2 段目に遡上域の断面積(S_{ru})を，同図の上から 3 段目に静水面より下に堆積した断面積(S_{uw})を示した．ここで，遡上域の断面積(S_{ru})は，図-3.4.1 に示したように汀線から遡上高までの静水面から上側の断面積で，断面積には侵食されていない盛土部分も含まれる．また，収支の議論を行なう上では，系外への損失を把握しておく必要があるが，

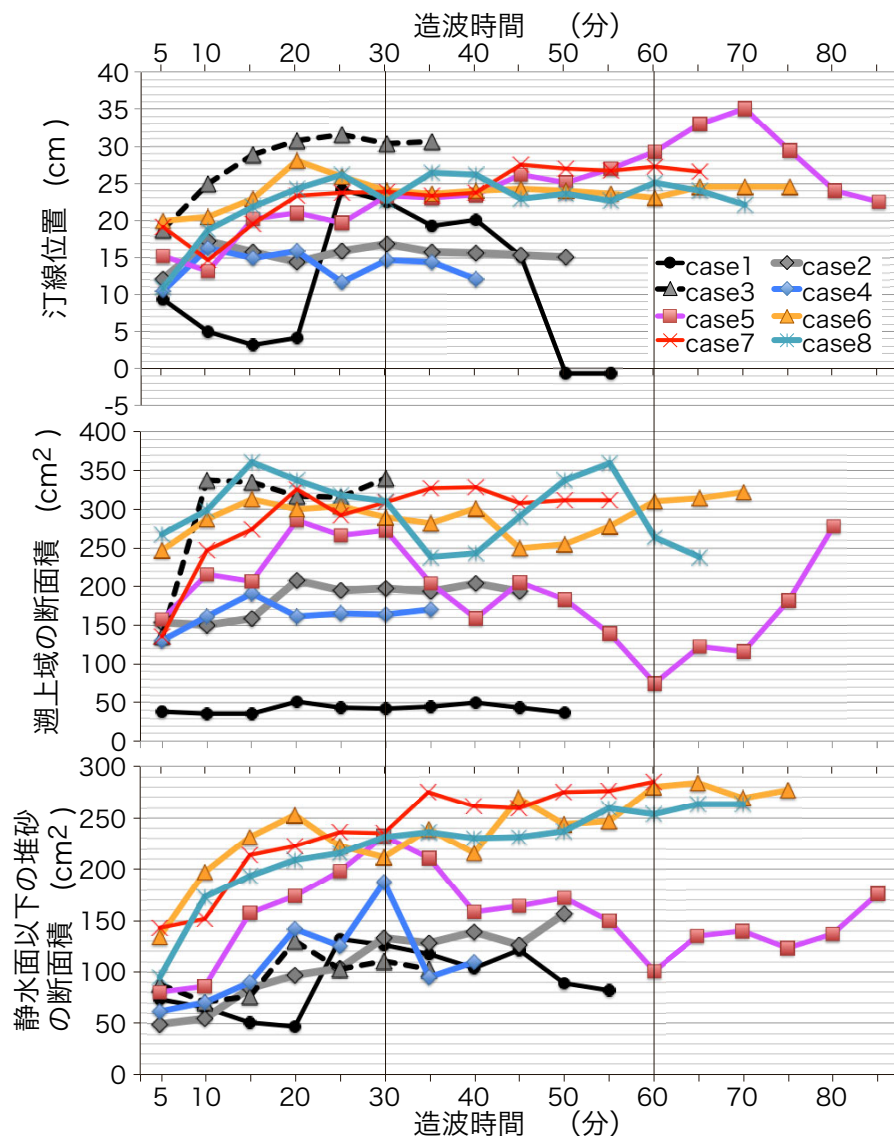


図-3.5.2 波 2 のの汀線位置(P_s), 遡上域断面積(S_{ru}), 静水面以下の堆積断面積(S_{uw})

延長 2 m の 1/10 斜面より沖側へ土砂が損失したケースの損失量は、case1, 4, 5 では約 13 cm²、case8 で約 24 cm² で、どのケースも材料 a のみが沖に損失していた。他のケースで、沖側への損失はなかった。

波 1 において、遡上域の断面積(S_{ru})は時間が経過しても大きな変化はないが、養浜材が礫主体である case1, 2, 4 は小さく、砂が主体の case3, 6, 7, 8 は大きくなっている。静水面以下の堆砂の断面積(S_{uw})の変化は、30 分後まで増加したのちにほぼ安定している。波 2 では、静水面以下の堆砂の断面積(S_{uw})は同様に 30 分後まで増加するが、中礫を多く含む case1, 4, 5 は断面積の減少が大きく、case5 では遡上域の断面積(S_{ru})も同時に減少している。

ここで、case5 波 2 の造波後 30 分以後で、汀線が前進するものの遡上域の断面積(S_{ru})が減少する状況について分析する。まず、盛土の侵食断面積(S_e)の変化に合わせて状況を確認する。図-3.4.2 において 25 分以降に侵食断面積(S_e)が減少したのは、波の遡上により侵食された範囲まで堆砂が生じ、断面積が回復したためである。その後の 50 分以降には、侵食断面積はほとんど変化せず、遡上域(S_{ru})と静水面以下(S_{uw})の断面積が減少しているにもかかわらず汀線位置(P_s)が前進した。これは、堆積により断面形全体が前進しており遡上域も前進することになるので、波が盛土の侵食面に到達せず、盛土が侵食されなくなり土砂供給がなくなる。初期状況と異なり土砂供給がない漂砂環境となり、動的安定であった遡上帯から沖側までに存在する土砂に対して、静的安定となるように土砂移動が生じた。このため、静水面以下では岸沖全体に堆積していた土砂のほとんどが陸側へ移動した。この沖側で侵食された土砂は、遡上域の最背後に次々と堆積して、斜面の上部を沖側に移動させる。この変化により前浜勾配が急になることで岸沖方向の長さが減り、遡上域の断面積(S_{ru})が減少する。

3.5.3. 砂と礫のそれぞれの役割

各ケースの 30 分時点の盛土の侵食形状と堆砂の状況を堆積した材料の違いとともに示したのが、図-3.5.3 (波 1) と図-3.5.4 (波 2) である。図中のハッチの違いは、堆積した材料の違いを示している。水色の線は、岸側が遡上時の水面形、沖側が碎波後の波の状況を示す。ただし、波の遡上高が最大となる時刻と碎波の特徴を良く表す時刻は異なるので、同一の時刻ではない。

波 1 では、表-3.2.1 に示したように材料 c のみが堀川・砂村の海浜変形のタイプ II のバーを形成する条件であり、他の材料についてはバーが存在しないタイプ III である。しかし、本実験では、全ケースでバーを形成する堆砂が生じた。また、波 2 については全ての材料に対して陸側への大きな堆砂が特徴であるタイプ III となるが、本実験では case3 以外は沖側にステップもしくはバーが存在する地形となっている。堀川・砂村の変形タイプは海浜地形が変形の供給源となる設定であるが、本実験は陸側から土砂が供給される模型設定であることが異なる。

巻波碎波後の波の先端部が固定床を叩き、その沖側にはバーが形成される。材料 a, b, c が含まれる case5 と 8 で、波 1 と波 2 とともに材料 a はバーの碎波位置側に多く存在している。形成の初期においては、材料 a が先行してバーの位置で往復運動するうちに、まとまった量となるとバーとしての形状をなして材料も移動し難くなる。また、case1 では材料 a は碎波が突入する位置を

含めて固定床全体に薄く分布していることが他のケースと異なる。

波 2 では、遡上高が大きいために盛土の侵食量も大きい。このために、堀川・砂村の海浜変化のタイプでは岸側へ移動する III の条件であるが、全てのケースで沖側に広く堆砂が生じている。また、材料 a や材料 b の粗い粒径は、

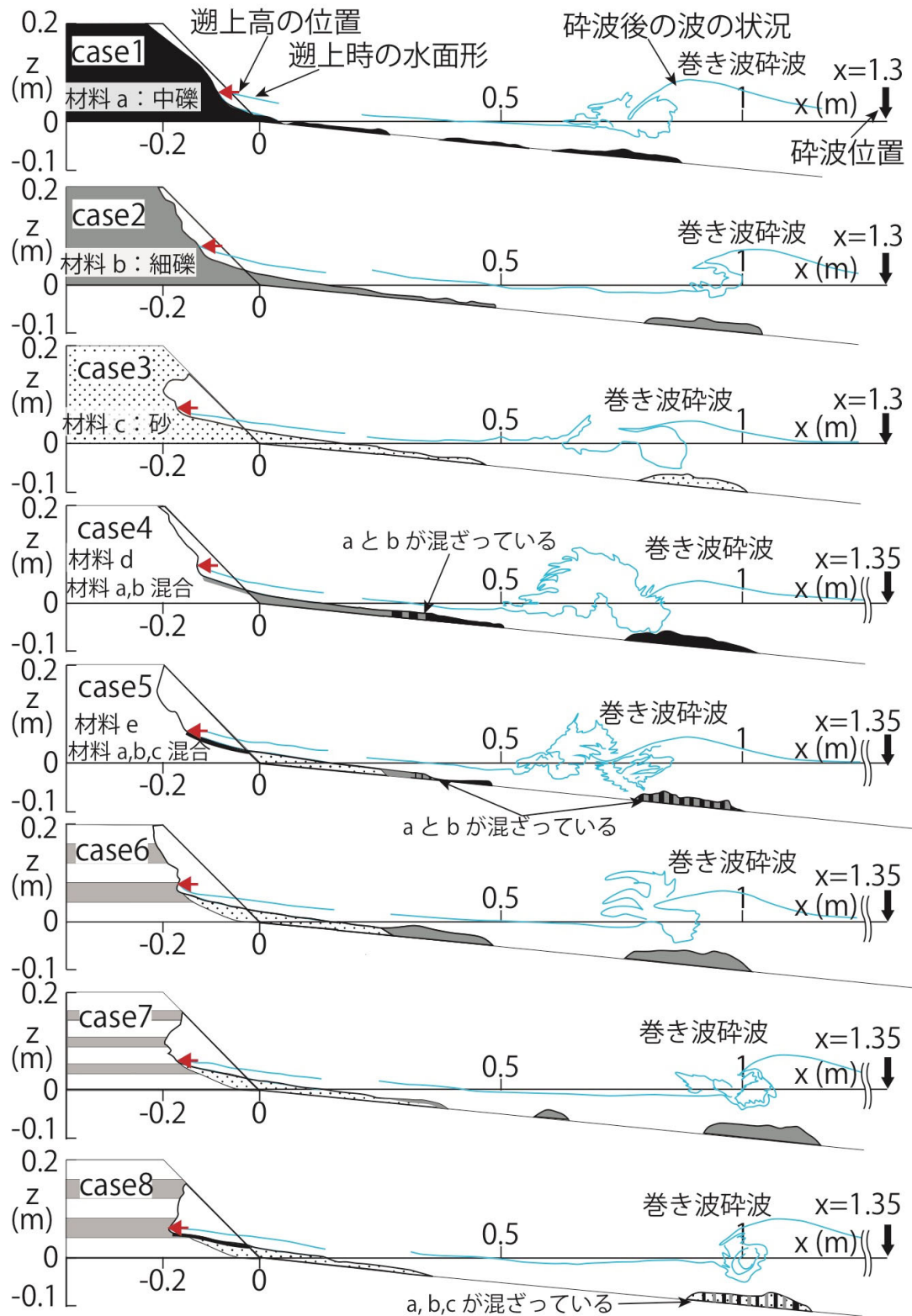


図-3.5.3 波 1 の 30 分時点の盛土の侵食形状と堆砂の状況

細かい粒径のものに被さる形で堆積したり，沖側に堆積している．砂の層の表面に粗い材料が被さると，表面の粗い材料は活発に往復運動を行うが，下の材料はほとんど動かなくなる．

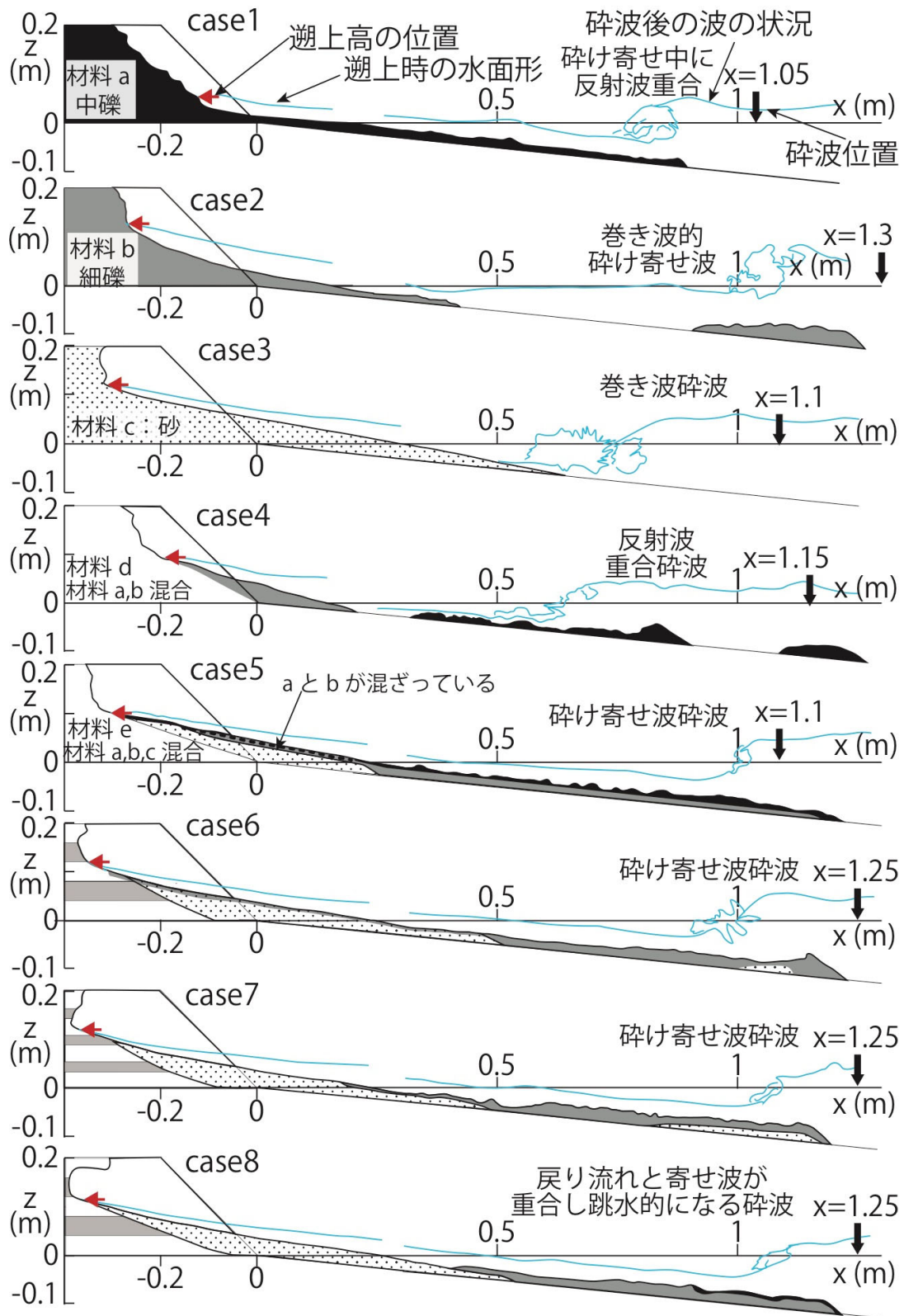


図-3.5.4 波 2 の 30 分時点の盛土の侵食形状と堆砂の状況

3.6. 盛土構造が礫と砂の互層である影響

case6～8 は、砂の間に材料 b もしくは材料 e を挟み込んだ構造の盛土としている．この構造は、盛土の崩壊状況が異なる層で侵食の進行が緩和することを期待したものである．互層とした場合の侵食の進行を case6 と 7 について、case5 とともに図-3.6.1 に示す．示したのは遡上高が大きくなる波 2 のものである．case6 と 7 のどちらも礫層がえぐられるように侵食形状となっている．このような、えぐられるような侵食形状は case5 では見られず、礫層を設けた場合に特徴的に生じる現象である．

この侵食の進行は、図-3.5.4 の最大遡上時の水面形から、case6 も 7 も上から 2 段目の砂の層に遡上波の先端が当たっているのがわかる．これにより、砂層が侵食して、礫層を支える下側の砂層が侵食を受けると土台を失った礫層は自然崩壊する．しかし、礫層の上にある砂層は遡上波が到達していないために締め固め状態が保たれてオーバーハングが生じる．

養浜盛土を砂と礫または礫混じりの層の互層で形成すると、礫層の安定性に関する脆弱な性質を強調することとなり望ましくない．

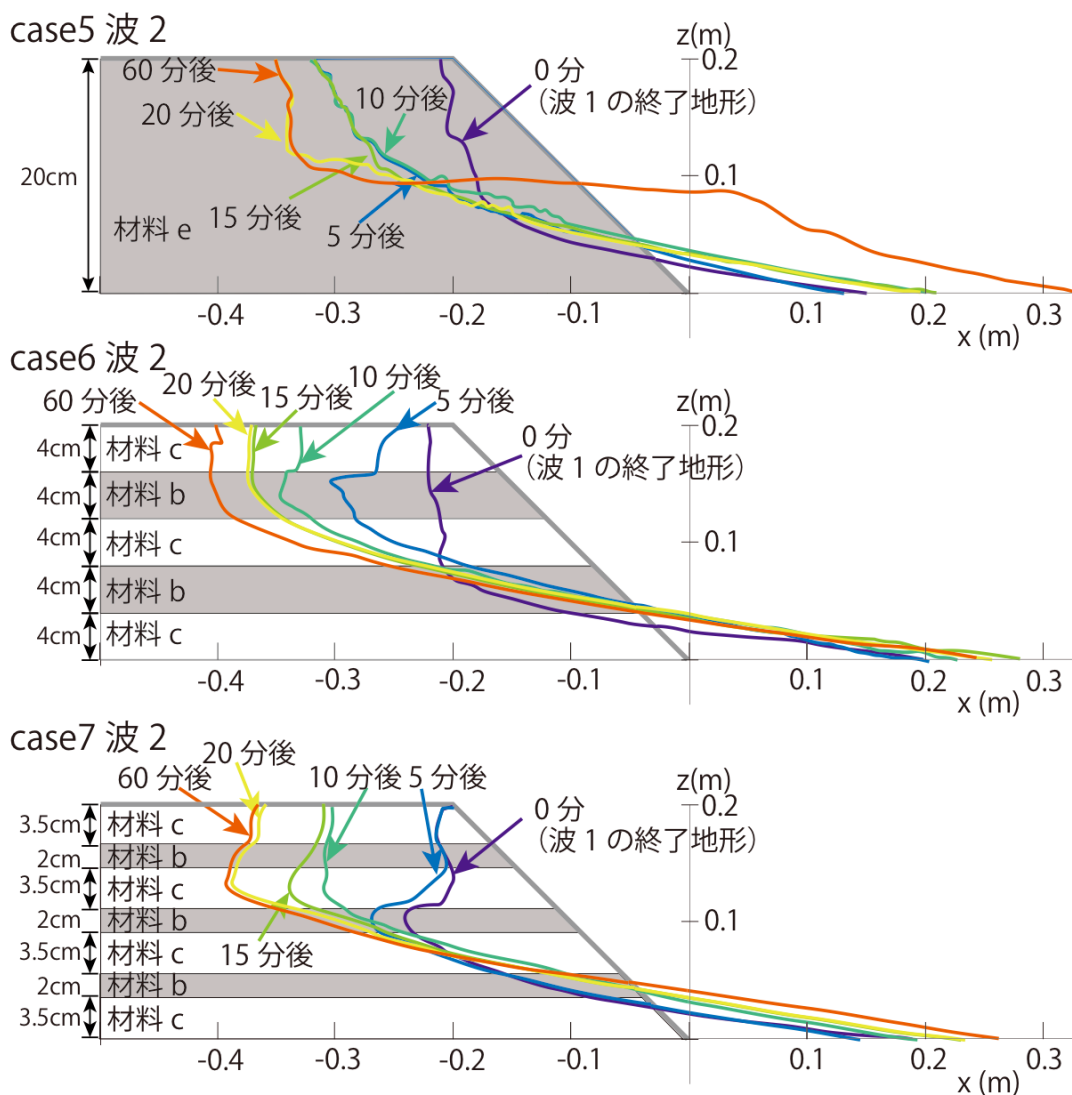


図-3.6.1 盛土の構造における礫層の効果

3.7. 盛土材料と盛土構造の前浜地形への耐波侵食性

本研究で行なった水理模型実験は、沿岸漂砂から切り離された水路実験であり、かつ固定床で高波浪が造波できないと言う制約された条件であったが、養浜材料と養浜構造の特性を把握することができた。

ここで、盛土材料と盛土構造の前浜地形への耐波侵食性をまとめると表-3.7.1 のようになる。砂のみの場合は、沿岸漂砂に起因する侵食海岸への養浜において高波浪時に耐えられない実績や大量の養浜量が必要となることから、総合評価を下げた。砂ばかり、礫ばかりでなく粒度の特性を生かして、海浜の回復であれば砂・細礫・中礫を均等な構成とする等により、目的に応じて前浜地形の耐波侵食性を向上可能であることが示された。

表-3.7.1 盛土材料と盛土構造に関する前浜地形の耐波侵食性に対する評価

材料と構造	case	盛土侵食	汀線後退	回復性	経済性	総合評価	理由
砂	3	△	◎	○	△	○	高波浪時に持たない 安定的な汀線管理には大量な数量が必要（経済性）
礫のみ	1,2,4	◎	×	△	×	△	盛土は侵食され難いが、浜は回復しない 多くは購入材となる
砂と礫の互層	6,7,8	×	○	△	○	×	材料が持つ崩れ易い性質を助長
砂と礫の混合	5	△	◎	○	○	◎	高波浪時の懸念があるが、バームの形成で耐波性向上 海岸の状況に応じた混合が可能

3.8. 礫が砂の流出を防ぎ前浜全体としての耐波侵食性が向上する仕組み

表-3.7.1 に示したように、砂と礫を混合させた case5 が最も耐波侵食性が高い結果となった。礫のみに対して優位となったのが、汀線の後退と回復性の項目である。これは、礫のみの養浜が歩留まりの向上の本位であるその場所に居留する特性が強調されるためである。これに対して、砂のみのものは養浜盛土を積極的に崩し水中へ土砂を供給するために汀線は前進する。しかし、養浜を施す海岸は侵食状態へ移行しやすい海底地形状態となっていることから高波浪に耐えることができない。砂と礫を混ぜることで相互の負の性質を補うことで耐波侵食性が向上する。

砂と礫を混合させることで前浜全体としての耐波侵食性が向上する仕組みは、礫が砂の弱点を補っていることが大きい。実験映像から得られた礫が砂の流出を防ぐ7つの仕組みを図-3.8.1に示す。砂礫が混合された養浜盛土は、波が衝突すると戻り流れによって直ちに粒度によって水中に入るか否かの分級作用を受ける（図中1）。さらに、盛土から水中に入った砂礫は、図中2,3,4のように波で岸沖方向に分級される。これらは、図-3.5.3で述べたように、砂と礫が別々にストックされることになる。具体的には、礫は沖側に、

砂は岸側にストックされる．沖側にストックされる礫が多くなると岸側の砂を覆うようにアーモークート状態を形成する（図中 5）．また，実験において，バームは砂層の上に沖に迫り出すように形成された（図中 6）．

礫が砂の流出を防ぐ仕組み

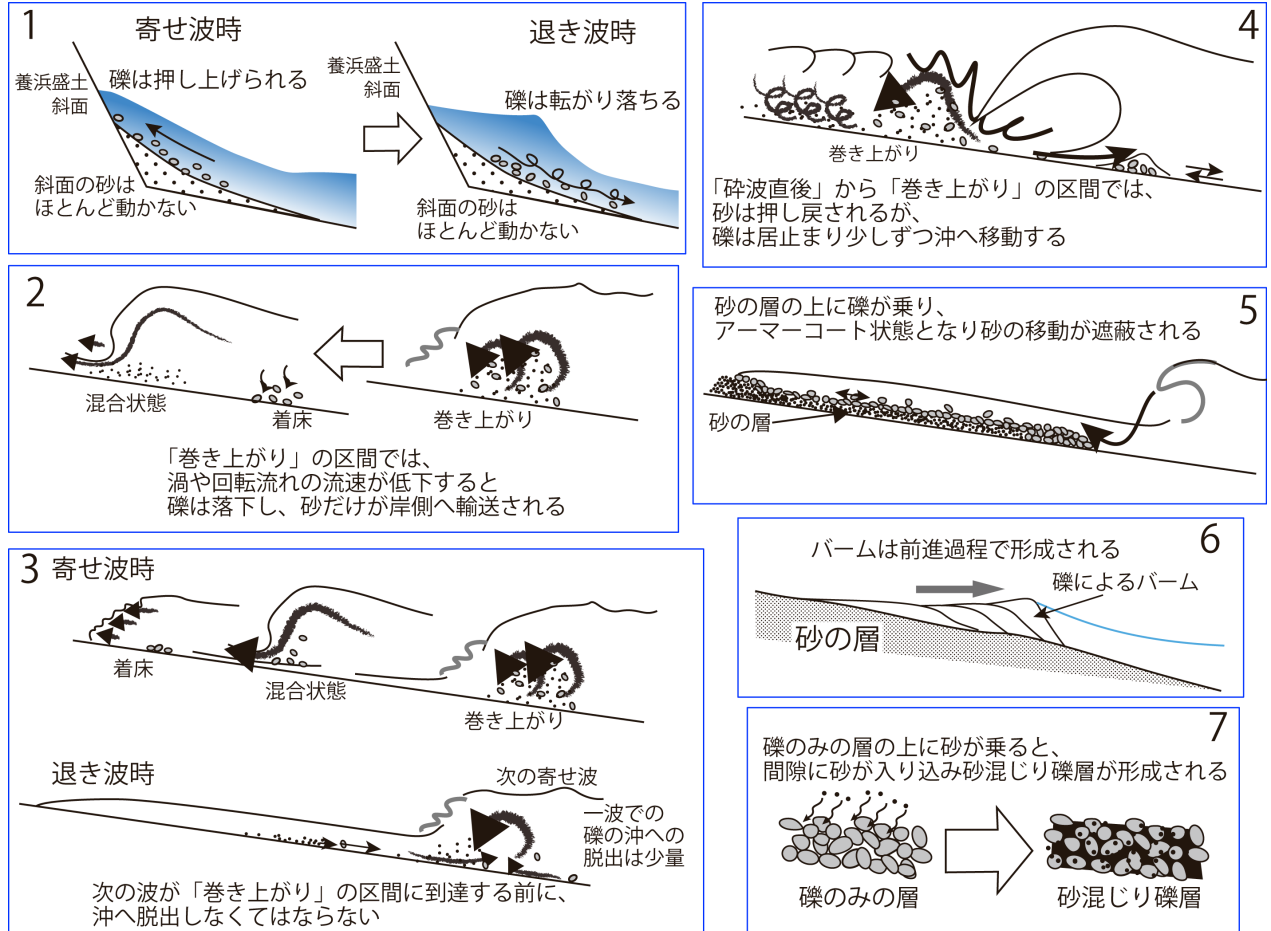


図-3.8.1 礫が砂の流出を防ぐ7つの仕組み

3.9. 現地トレンチ調査の再解析

海浜全体としての耐波侵食性が高いと評価した case5 は、波 2 において 85 分間にわたり造波してバームの形成を追った．波 2 の造波前の地形から 5 分毎の地形変化を図-3.3.5 の下段の汀線付近から盛土の間を拡大して図-3.9.1 に示す．線の色は、堆積傾向の時間は暖色系として最も前進した 60 分後で赤となるように、侵食傾向の時間は寒色系で緑から水色へ変化するように配色した．バームは、頂部の高さをほとんど変えずに前進していることがわかる．これは、波の遡上高とほぼ一致しており、式(2.4.5)の武田・砂村の仮定を裏付けている．

次に、case5 波 2 の造波終了後に撮影された堆積状況を図-3.9.2 に示す．現地トレンチ調査と同様に礫のみの層、砂のみの層、混合層が見られる．図-3.8.1 に関連するものに番号を付した．沖側の砂の層では、2 層の貝殻の層が

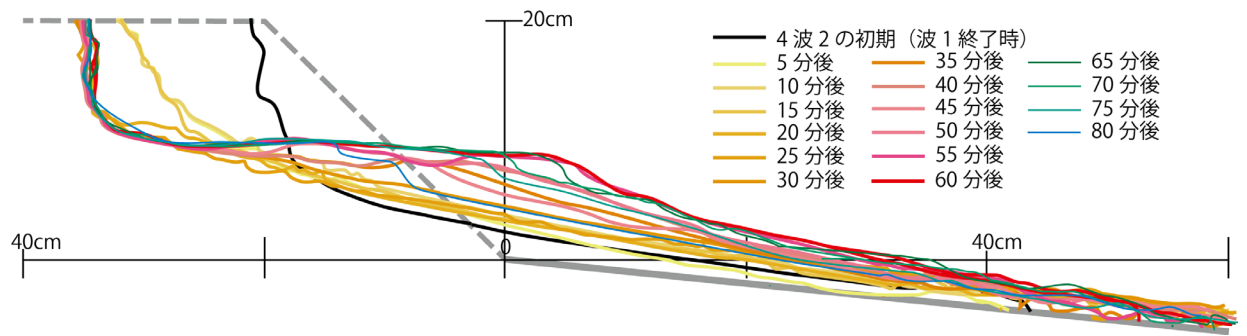


図-3.9.1 バームの形成過程 (case5 波 2)

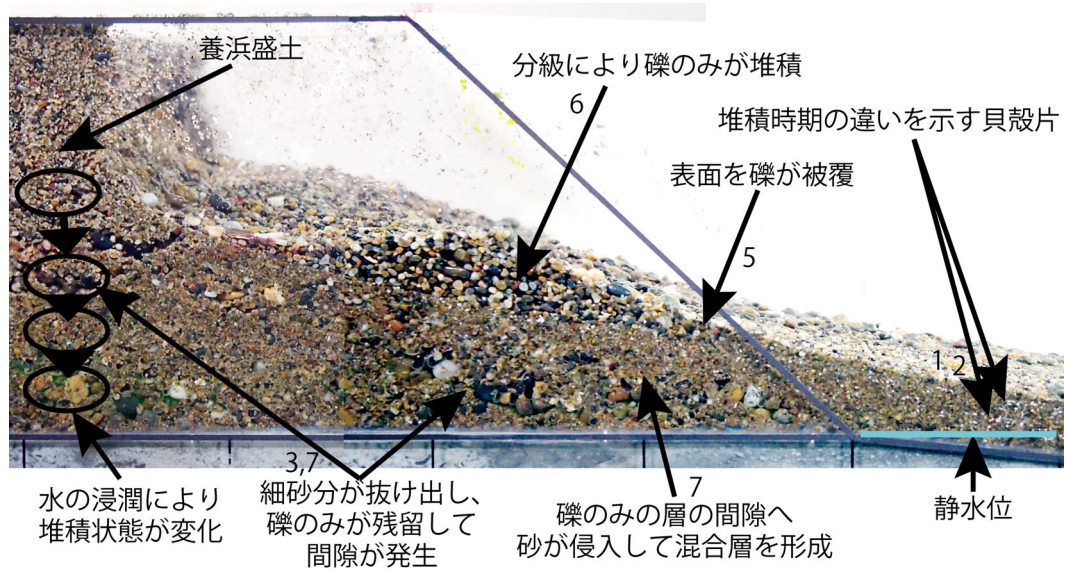


図-3.9.2 実験で得られた堆積層 (case5 波 2)

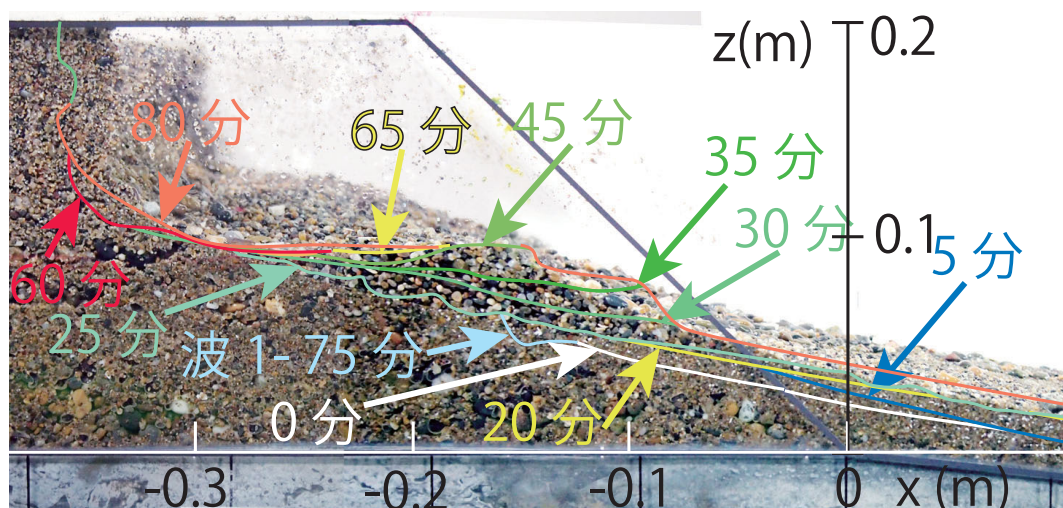


図-3.9.3 造波終了後に残存した境界と形成時刻 (case5 波 2)

見られる。盛土の初期形状から侵食された部分に礫が堆積し、その上に細砂がさらに堆積し、それが下層の礫の間隙に入り混む状況が見られる。

図-3.9.3 は、case5 波 2 の造波終了後に撮影された堆積状況に各時刻で測定された海浜地形表面を比較して残存する表面のみを残したものである。第 2 章で示した現地海岸におけるトレンチ調査で、定期測量結果を同じ手法で重ね合わせた。養浜の下手の海岸の駒越南町地先では、養浜の礫材が砂層の上にバームを形成しており同様な堆積状況を実験においても再現できている。また、現地トレンチ調査の結果によるとほとんどの砂層の境界面は直線状であったが、これは波による侵食で形成されたことが実験で確認された。

第 2 章 図-2.1.3 で示した現地海岸のトレンチ調査から得られた 7 つの堆積状況と図-3.8.1 の 7 つの仕組みを組み合わせたのが図-3.9.4 である。堆積状況のそれぞれが形成される過程に必要なメカニズムを 7 つの仕組みから選んで青い囲みでまとめた。ただし、図-2.1.3 の写真と波の遡上方向を合わせるために図-3.8.1 の図を左右反転させて記載している。

イ) のバームの形成過程については、宇多ら(1989)の研究等があり、トレンチ調査を実施した 3 海岸で得られた状態や礫が天然砂浜よりも多くなることを考えると実験で得られた仕組み 6 が相当する。実験では水位も波も単一としたがこれらが変化することにより、バーム頂を越えて背後に堆積が生じることが推定できる。

ロ) の礫のみで形成されるメカニズムは、現地では砂の層の上に礫のみの層が存在したり逆の状態であったり、砂と混合しない状態となっている。これを説明可能であるのが仕組みの 1 と 5 となる。どちらも砂と礫の分級が生じた結果、砂面上を礫が覆いアーマー状態となるが礫のみは動き続け、勾配に合わせて岸側へ拡散するか、遡上高に合わせて厚く堆積する。

ハ) は礫が指向性を有した堆積構造を形成しているが、その間隙に細砂が充満した状態となっている。指向性を有して堆積する場合には、指向性を決定する水流が周囲に必要となる。しかし、砂と礫が同時に堆積したとすると砂と水のスラリー状態に粒径が大きく異なる礫が混在することになるが、礫は密集せずに砂の中の礫の状態に堆積すると考えられる。したがって、仕組みの 7 による砂が後から侵入するメカニズムが適当となる。

ニ) は砂のみが堆積する場合で、海岸に砂しか存在しないか分級作用により砂のみが堆積した場合である。砂礫海岸や砂礫混合養浜を実施した場合には、分級は頻繁に生じる現象であるかが問題である。本実験から分級は、盛土の侵食と同時に行われるとともに、移動中は混合した状態の方が稀である可能性が高いことがわかった。また、砂と礫が選択的に堆積に寄与することは、2.4.6.c 節「2014 年 9 月と 11 月の間に主要な層が形成された時期の推定」で示した。

ホ) は、扁平な石が岸側奥まで到達するものである。寄せ波時には、まき上りの過程で礫の形状が選択され遡上時に高速で薄い流れに乗ることができる形状のみが遡上限界近くまで打ち上がることができることを示している。

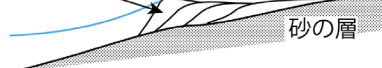
ヘ) は、礫と砂が指向性なく混合している状態で、底質の混合を激しく生じた場所かその後も混合状態を維持して分級が進行する前に堆積した場合に生じる。ただし、砂の割合が大いき場合には、ハ) で示したようにスラリー状となることで生じると考えられる。

イ) 礫だけで構成され三角形形状をしたバーム部分



バームは前進過程で形成される
礫によるバーム

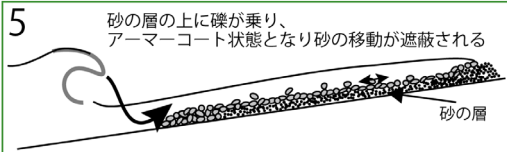
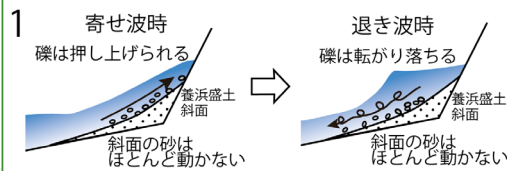
6



ロ) 礫だけで構成されている

ロ-1) 大礫

ロ-2) 細礫



ハ) 主に礫で間に砂が詰まっている



7

礫のみの層の上に砂が乗ると、
間隙に砂が入り込み砂混じり礫層が形成される



砂混じり礫層

ホ) 砂の層の間に飛び石

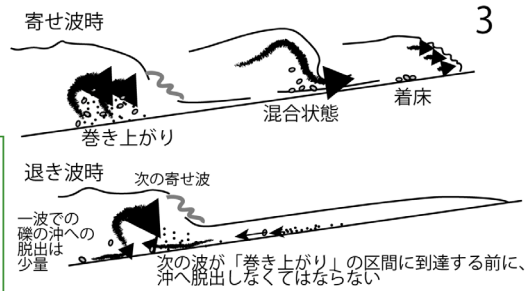
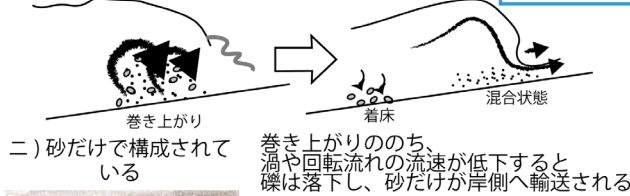


ヘ) 礫と砂が混合



2

分級過程



3

図-3.9.4 堆積状況と礫の移動形態の関係

3.10. 実験のまとめ

現地で見られた、耐波侵食性を高くするとともに、堆積層を厚く岸沖に広い分布した状態を形成するメカニズムを礫と砂の相互作用の観点から解明するとともに、耐波侵食性が向上する養浜盛土の構造を検討するために半移動床の水理模型実験を実施して、主として次の点を明らかにした。

礫と砂の移動・堆積状況から、

- 1) 砂礫混合の養浜材料は盛土が侵食されると直ちに分級される。
- 2) 砕波による波の突っ込みや遡上時のボアは、砂・礫を分級する。
- 3) 分級された砂と礫は、異なる移動形態となるとともに、地形形成の役割が異なる。
- 4) 礫の方が、砂よりも活発に移動する。礫は砂の堆積層の表層を移動して砂の侵食を防ぐ効果がある。
- 5) 砂が礫層の上に堆積すると比較的容易に間隙に侵入する。波による抜け出しも先に生じる。
- 6) 汀線の前進時の堆積過程でバームが形成されて、バームが波の背後への到達を防ぐ。

という結論が得られた。

これらの 1)～6)を整理して、礫が砂の流出を防ぐ 7 つの仕組み (図-3.8.1) として示した。また、現地トレンチ調査から得られた図-2.1.3 の堆積状況との関連を図-3.9.4 により説明した。

さらに、盛土を形成する構造について、

- 7) 砂層と砂礫混合層の互層は耐波侵食性が低い
- 8) 砂成分を多く含む場合には、盛土は侵食されやすいが、沖側の水中にストックされた砂が戻り高い回復性を有している。

という結論が得られた。

以上から砂と礫の堆砂メカニズムから砂礫混合養浜が海浜の耐波侵食性の向上に有効であることが示された。

参考文献

- 堀川清司・砂村継夫・近藤浩右 (1974) : 波による二次元海浜変形に関する実験的研究, 第 21 回海岸工学講演会論文集, pp.193-200, 1974.
- 宇多高明・小俣篤・竹渕 勉 (1989) : 前浜地形変化の支配要因とバームの形成過程, 土木学会論文集, 第 411 号 II-12, pp.227-236.

4. 結論

4.1. 主要な結論

本研究では、砂礫の堆積過程の解析のために実施されたトレンチ調査と砂礫層形成を再現する水理模型実験から、礫成分のバーム形成による波の遮蔽効果や砂面を礫が覆うことによる移動の抑制効果等の耐波侵食性を向上するメカニズムを示し、これらを効果的に発現できる砂礫混合養浜が有効であることを示した。主な結論は以下の通りである。

1. 砂礫の堆積過程の解析のためのトレンチ調査のまとめ

本研究で、砂礫混合海浜の形成過程を解明するために砂礫の打ち上がりから遡上限界までを連続して把握するトレンチ調査手法を構築した。この手法を用いて、静岡清水海岸、富士海岸、浜松篠原海岸で、各3本計9本のトレンチ調査を掘削し、層理面の把握、礫層からのサンプルと粒度分析、定期測量、海象観測との比較など総合的に解析することにより、以下の結論を得た。

- 1) 海浜での堆積過程は複雑であるため、堆積層を形成した条件の把握は、通常のボーリング調査や ^{14}C 年代測定では堆積状態や堆積メカニズムの把握は困難で、トレンチ調査による層理面把握と海象情報等を組み合わせることで解析することが有効である。
- 2) 堆積状態は概ね7つに分類できた。また、堆積層中の礫の多くは層を形成した水流の方向に沿う指向性を有している。
- 3) 海象観測データから粒度別に武田・砂村(1983)のバーム形成条件と推定バーム高さを推定し時系列したものと堆積の状態を比較することで、堆積層を形成した気象擾乱の特定が可能である。
- 4) これらを通じて、海象条件（波高、周期、潮位）の変化と幅広い粒度の存在が堆積層の形成に重要であることが明確になった。
- 5) トレンドを除去した汀線位置の変動量の解析では、粒度構成が自然海浜に近いサンドリサイクル（清水海岸 No.13）や現地海岸より大きな粒径のみ（富士海岸 No.43）の養浜では、海浜の耐波侵食性の向上効果が認められなかった。一方、砂成分主体の海岸において、砂礫混合養浜を実施した海岸（浜松篠原海岸）では耐波侵食性が向上すると評価できた。

2. 水理模型実験のまとめとトレンチ調査結果の対比

トレンチ調査で確認された礫の堆積状況を再現し、堆積層を形成するメカニズムと耐波侵食性向上を有する養浜盛土の構造を検討するために水理模型実験を実施し、以下の結論を得た。

- 1) 砂と礫は、分級により、粒度毎に異なる移動形態となるため堆積位置も異なり、その結果として地形形成の役割も異なる。
- 2) 養浜盛土から供給された礫は全体として沖側の碎波点以浅に流出する。一方、砂は岸近くに堆積して、遡上域までの地形の回復に寄与する。
- 3) 砂と礫の移動形態を分級やアーマールコート化により礫が砂の流出を防

ぐ7つの仕組みとして整理した。

- 4) 盛土断面積，汀線位置，堆積断面積等の時系列と前述のメカニズムをふまえて盛土の侵食，汀線の後退，海浜回復性から，養浜盛土の材料と構造を総合的に評価した。その結果，砂礫混合養浜とすることで礫が砂の堆積層を覆い留める効果や水中にストックされた砂が海浜断面積を回復する効果の相互の役割が生かされ効率の良い養浜となることが確認された。

また，実験結果を踏まえて現地トレンチ調査について再解析し，以下の結論を得た。

- 1) 現地海岸で見られた砂と礫の堆積状況と実験で見出された礫が砂の流出を防ぐ7つ仕組みを対応づけることができた。
- 2) 現地海岸で示された砂礫混合養浜により耐波侵食性が増すメカニズムを，実験で得られた礫が砂の流出を防ぐ仕組みとの関連で説明した。

4.2. 今後の課題

本研究の特徴の一つは，汀線より陸側の遡上帯を中心に表層のみでなく内部構造の特徴もふまえて砂礫混合養浜の有効性を実証的に明らかにした点である。本研究の成果は，養浜実施の際に活用できると期待されるが，漂砂系全体を俯瞰した砂浜保全において効率的な養浜の設計として確立するためには次にあげる課題が残されている。

- 1) (粒度の変化) 養浜を継続することにより，粒度が変化する影響を設計に取り入れる必要がある。富士海岸も当初は，もとの砂との砂礫混合の海浜となっていた。大量な礫の供給により礫海岸の特徴に変化した可能性がある。現環境を維持するには，砂の流出等も考慮して粒度分布を変える養浜設計が必要となる。
- 2) (流砂系の総合土砂管理) 養浜のライフサイクルコストを考える場合には，河口からの供給量が増えることにより養浜量が大きく変化する。しかし，河口部での土砂動態を再現する手法は確立されていない。総合土砂管理の取り組みとともに供給効果の把握の進展が望まれる。
- 3) (モニタリング) 遡上帯は常に見える領域でありながら，遡上帯の情報が少ない。定期測量において，地形測定の時空間密度が小さかったり，陸上が測定されていなかったりと蓄積が少ない。現状では深浅測量と陸上の測量は分かれており，このため定期測量に多くの費用が必要となっていることも一因である。水中から遡上帯までのシームレスな計測をコストダウンにより高頻度の実施可能とする地形測定技術が必要である。
- 4) (数値シミュレーション) モニタリングはシミュレーションの再現性に影響し，現状で浜漂砂に関する数値シミュレーションの精度が高くない。汀線より陸側へ養浜を行うことが多く，その場合には養浜材料は遡上帯での移動の把握が重要となることから，遡上帯での堆積メカニズムを取り入れることによる数値シミュレーションの高度化が必要となる。

上記の課題を解決することで、より効率的な養浜が実現する。これにより、養浜実施の懸念が低下するとともに、総合的土砂管理が海岸にとって現実的となり、良好な海岸環境を後世へ継承できる海岸が増えると考えられる。

謝辞

本論文をまとめるにあたって、東京大学大学院工学研究科社会基盤学専攻教授 佐藤慎司先生には、テーマ設定の段階から終始ご指導を戴きました。ここに、深甚なる感謝の意を表します。

また、筑波大学大学院情報システム系 教授 武若 聡先生、東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻教授 池内幸司先生、同専攻教授 田島芳満先生、同専攻教授 下園武範先生には、多面的な議論を通じて、的確かつ有意義なご助言をいただきましたことを深謝いたします。特に、池内先生には、元国土交通省技監としても叱咤激励をいただき、特に自信が沸き上がるお言葉をいただきました。

本研究の核心部分のトレンチ調査は、国土技術政策総合研究所（以下、国総研）河川構造物管理研究官（当時、海岸研究室長）の諏訪義雄氏とともに興味本位で掘り始めたもので、その開拓精神なくしてこの研究は有り得ません。

浜松篠原海岸のトレンチ調査では、当地を研究対象とする土木研究センターなぎさ総合研究所長 宇多高明博士（元海岸研究室長）、同センター河川・海岸研究部主任研究員 石川仁憲博士に参加戴き、現地にて形成過程について議論しながら調査できたことは有益でした。また、富士海岸、静岡・清水海岸、浜松篠原海岸でのトレンチ調査について、国土交通省中部地方整備局沼津河川国道事務所、静岡県静岡土木事務所、静岡県浜松土木事務所の海岸担当各位には、トレンチ調査実施の御協力とともに定期測量データの御提供を戴いたことに謝意を表するとともに、長期の定期測量データの取得と蓄積の労に対して敬意を表します。

平成 19 年に宮崎市で開催された第 54 回海岸工学講演会で佐藤先生に初めてご相談してから、方向転換も含めてまとめあげるまで丸 11 年を要してしまいました。その間、水源地環境センター研究第三部長（元 国総研河川研究室長）金澤裕勝氏には、お会いするたびに激励をいただき、心の支えとなりました。また、京都大学防災研究所准教授 森 信人先生には、小さくも強力な秘訣を戴き研究を確実に進展させることができました。

また、本研究には、多くの方々から戴いた海岸侵食についてのお教えが根底にあります。

埼玉大学水理研究室では、堀川清司先生と池田駿介先生に卒業研究をご指導して戴きました。両先生の影響があつてこそ、建設省土木研究所河川部海岸研究室に任官し研究の道へ進んだと言っても過言ではありません。

入省当時の海岸研究室長は、宇多博士であり、富山県、新潟県、福島県、茨城県を中心に海岸侵食の現場を供として歩き、「砂の気持ちになって考える」ことを習慣づけられたことが本研究の堆積の仕組みを考える上で活きました。

京都大学防災研究所教授 田中茂信先生の海岸研究室長時代には Macintosh による画像解析が導入されて津波の伝播機構や砂の動きを解明しましたが、この解析リテラシーが本研究に生かされています。さらに、田中先生には、砂と礫の移動の違いを説かれ、これが本研究のテーゼとなっています。

時期を同じくして、佐藤先生が土木研究所海岸研究室に来られました。佐藤

先生の御着任の御挨拶の冒頭は、「研究とは楽しいものです」でした。佐藤先生と田中先生と共に、津波の戻り流れによる護岸前面の洗堀や緩傾斜ブロック堤の堤体砂の吸出し機構等の解明の大規模水理模型実験、阿字ヶ浦観測栈橋での集中観測を実施しました。これらが、その後の実験や現地調査の原点と言えます。これらの機会を与えてくれた両先生に深謝するとともに、これら施設を残して戴いた先輩方に畏敬の念を抱かずにはられません。

韓国海洋科学技術院名誉研究員 安熙道博士および台湾經濟部水利署副署長 曹華平氏には、それぞれに我が国と同様な海岸侵食の現場を巡検する機会を戴き、急流河川の土砂供給が形成する混合粒径海岸の地形変化の理解がアジア諸国共通の課題であることを実感できました。

そして、海岸侵食に関してご相談を戴いた全国の海岸担当者の皆様、国総研海岸研究室の皆様、書くとなれば枚挙にいとまがないほど、多くの方々のお力添えを戴きました。

さらに、大型台風が毎週のように来襲し、お忙しい最中に公聴会にお越しいただき議論をして戴いた海岸研究者・技術者各位に御礼申し上げます。

本研究のほとんどは、国総研の基礎基盤研究費による成果を用いました。このような基礎研究を行う経費を組織として保持されていることに感謝いたします。

最後に、日々支えてくれた妻 るみ、受験年と重なり一緒に日めくりカレンダーを作りトリプル受験として頑張った夏未と爽華、そして、産み育ててくれた亡父 武重と母 朝子、兄 繁一、家族の皆、本当にありがとう。

平成 30 年 10 月