土木学会論文集, Vol.80, No.17, 24-17155, 2024.

清水海岸の4,5号ヘッドランド付近での養浜時地形変化の観測

宇多　高明[1]・梅原　裕[2]・杉本　直弥[3]・竹内　由衣[4]・石橋　さくら[5]

[1]正会員　（一財）土木研究センターなぎさ総合研究所兼日本大学理工学部海洋建築工学科
（〒110-0016 東京都台東区台東 1-6-4）
E-mail: uda@pwrc.or.jp
[2]静岡県交通基盤部静岡土木事務所工事第2課（〒422-8031 静岡市駿河区有明町2-20）
E-mail: hiroshi1_umehara@pref.shizuoka.lg.jp
[3]静岡県交通基盤部静岡土木事務所企画検査課（〒422-8031 静岡市駿河区有明町2-20）
E-mail: naoya3_sugimoto@pref.shizuoka.lg.jp
[4]八千代エンジニヤリング（株）（〒111-8648 東京都台東区浅草橋5-20-8 CSタワー）
E-mail: yi-takeuchi@yachiyo-eng.co.jp
[5]正会員　八千代エンジニヤリング（株）（〒111-8648 東京都台東区浅草橋5-20-8 CSタワー）
E-mail: sk-ishibashi@yachiyo-eng.co.jp (Corresponding Author)

清水海岸では，離岸堤やヘッドランドなどが設置されているため，北東向きの沿岸漂砂が確実に北端部まで到達可能かどうか十分明らかにされていない．そこで2022年1月，安倍川の河道掘削土砂（d_{50} = 2 cm）2.75万 m^{3}を4, 5号ヘッドランド（HL）間に投入し，4回のNMB測量とUAV測量によりその移動状況を調べた．これによれば，養浜により2022年5月までに-4 m以浅で集中的な堆積が起きたが，その堆積域が波の作用で同年9月までには北東側へと200 m移動した．4, 5号HL間での2022年5月までの総堆砂量は3.8万 m^{3}であったが，総量のうち養浜砂は74%を占めた．また，養浜砂の沖への流出量はわずかで，漂砂の移動高8 mを保ちつつ沿岸方向に運ばれたこと，またHLがあると沿岸漂砂は一時的に阻止されるが，最終的には北東向きに運ばれることが分かった．

Key Words : *Shimizu coast, artificial headland, beach nourishment, beach changes, longshore sand transport*

1.　まえがき

駿河湾西岸に位置する清水海岸では，南寄りの方向からの入射波が卓越しているために，北東向きの沿岸漂砂が発達し，この漂砂により安倍川河口から運ばれた砂礫が海岸線の北端付近に堆積し，三保松原砂嘴を形成している（**図-1**）．この海岸の漂砂源である安倍川では，過去に砂利採取により流出土砂量が激減し，河口部から侵食が進んできた．このため静岡海岸から順に護岸や離岸堤などによる侵食対策が施されたが，1967年における安倍川での砂利採取の禁止措置以降，1982/1983年頃から土砂供給量が増加し，安倍川河口に近い場所から砂浜の復元が進んできた[1)]．その際，砂礫の塊（sand body）が，約260 m/yrの速度で離岸堤群を埋めつつ漂砂下手側へと移動してきた．一方で，静岡・清水海岸では海岸防護のために多数の離岸堤が並べられ，またその北東端近傍では，2基の離岸堤を組み合わせた離岸堤式ヘッドランド（1号～5号HL）とL型突堤が造られ，さらにその北側では消波堤の設置が進められた．このように現況では様々な対策施設が海岸線に並んでいる．このような海岸において，**図-1**に示すように三保松原砂嘴周辺において区域1, 2, 3を設定したとき，静岡・清水海岸の境界を含む区域1では，sand bodyの東向き移動と，離岸堤によるsand bodyの移動遅延が起きている[2)3)]．sand bodyの移動遅延は，

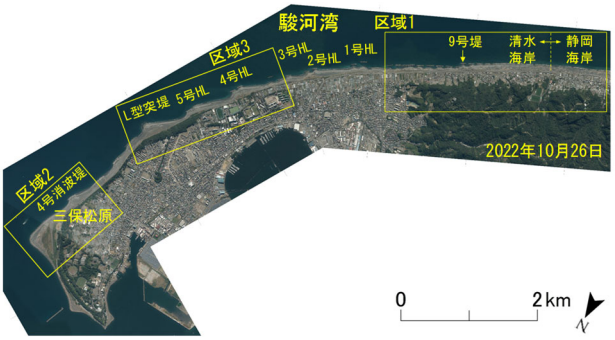

図-1　三保松原砂嘴の衛星画像と区域1,2,3の配置

とくに図に示す9号離岸堤（堤）付近で著しく，その移動促進方法が検討されている．一方，三保松原砂嘴の先端部を含む区域2では，砂嘴先端部で採取した砂礫を南側のL型突堤近傍へと運んで養浜するサンドリサイクルが行われている．このサンドリサイクルは，L型突堤下手側の海岸線の動的維持を目的としており，そのために毎年5万 m^3以上の砂礫を運んで養浜を行う事業を継続実施しなければならず，それに多額の経費を要することが課題となっている[4)5)]．これには上手側の区域1で滞っているsand bodyが砂嘴先端にまで到達可能となれば砂輸送量の低減に役立つと考えられる．しかし区域1, 2の間には1～5号HLとL型突堤が既に設置されている．これらのうち，4, 5号HLの東側直近のフック状汀線部分では，浜幅が狭く，越波が危惧される状態にある．そこで区域3では，sand bodyが到達するまでの期間は，養浜により越波防護のために必要な浜幅を維持しつつ，沿岸漂砂が下手側へと滞りなく流れる状況にすることが求められた．このことから，sand bodyが到達するまでの期間における，今後の養浜計画の検討の必要性が高まった．この検討の一助として，2022年1月～4月には，安倍川河道の掘削土砂2.75万 m^3を用いて4, 5号HL間で養浜を行い，土砂投入後，水中部ではNarrow Multi-Beam（NMB）測量を，陸上部ではUAV測量を行うことにより養浜時の地形変化の追跡調査を行った．本研究では，これらの測量結果より投入土砂の移動状況を解析し，この付近での土砂動態について調べた．その際，調査期間中の波浪条件については，久能沖波浪観測所での観測結果を参照した．

2. 養浜方法と地形変化の追跡調査

本研究の調査対象は，**図-1**に示す三保松原砂嘴の外縁に定めた区域3であり，4，5号HLとL型突堤を含む区域である（**図-2**）．なお，**図-2**に示すSt.1～St.3は後述の2023年4月25日実施の現地調査時の写真撮影地点を示す．まず，**図-3**には養浜前の2021年12月23日の測量結果を4, 5号HLの位置と100 m間隔の測線配置とともに示す．養浜土砂には安倍川の河道掘削土砂（中央粒径約20 mm）が用いられ，4号HLの北東側を通る測線No.44, 45間より投入された．土砂はダンプ輸送され，土砂投入域ではT.P.+6 mの平坦面を造成し，この平坦面の海側端から重機により土砂を汀線へと押し出した．

養浜後の地形変化を調べるための追跡測量は，初回を2021年12月23日とし，その後2022年5月17日，2022年9月26日，および2023年2月17日の4回行った．これらの測量結果より，初回基準での各時期までの地形変化量，および測量回ごとの地形変化量を算出した．

3. モニタリング調査期間中の波浪条件

清水海岸の久能沖波浪観測所での波浪観測結果を**図-4**に示す．図には上記4回のNMB測量とUAV測量の実施時期を青矢印で示す．既往の清水海岸の三保松原砂嘴の変形予測では，5%出現頻度波浪として，波高H = 3.0 m, 周期T=9.0 sの波浪が選定され，この波浪条件を与えた場合，BGモデルにより実測地形変化がうまく説明されている[5)]．これを考慮して，観測期間中の高波浪発生の閾値として

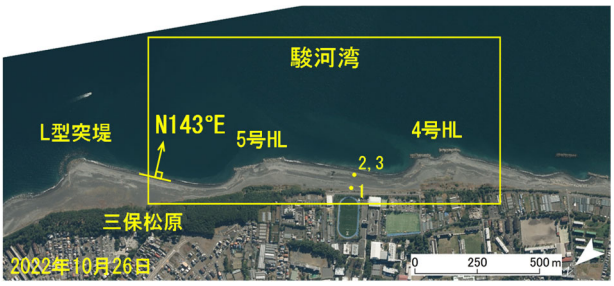

図-2 清水海岸の4, 5号ヘッドランド（HL）周辺の調査区域

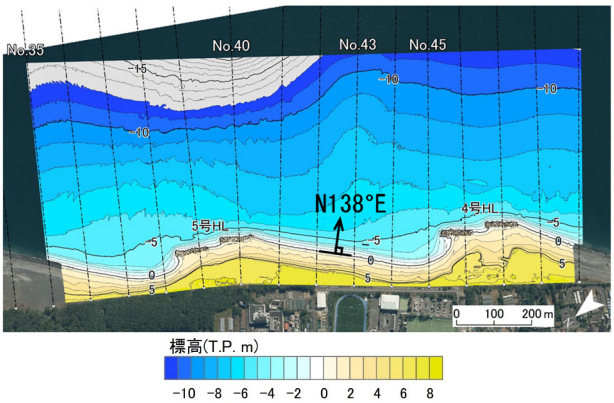

図-3 4, 5号HL付近の深浅図と測線配置（2021年12月23日測量）

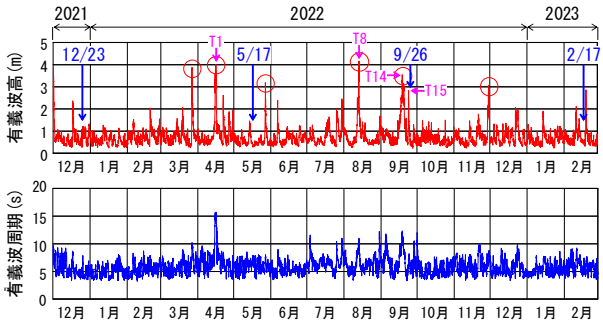

図-4 久能沖での波浪観測結果（2021年12月～2023年2月）

表-1 モニタリング期間中に出現した高波浪一覧

No.	高波浪観測日時	有義波高 (m)	有義波周期 (s)
1	2022/3/27 1時30分	4.02	9.7
2	2022/4/16 5時20分	4.04	15.1
3	2022/5/27 8時50分	3.33	7.5
4	2022/8/13 14時40分	4.36	9.7
5	2022/9/18 21時50分	3.81	12.6
6	2022/11/30 2時40分	3.35	8.5

有義波高3 mを選ぶと，閾値を越える高波浪は，図に○で示すように6回発生した．これらの時期の波浪条件をまとめて**表-1**に示す．2022年春季には2022年3月27日，4月16日，5月27日に高波浪が襲来した．これらのうち，4月16日の波浪は台風1号によるもので，周期が15.1 sと異常に長いことが特徴であった．その後，6, 7月は相対的に静穏であったが，秋季には8月13日，9月18日，11月30日に高波浪が襲来した．6回出現した高波浪のうち，最大波高は8月13日に襲来した台風8号時の$H_{1/3}$＝4.36 m（$T_{1/3}$＝9.7 s）の波であった．

4. 平面測量データの解析

まず，突堤および離岸堤などの施設により沿岸漂砂が阻止され，施設の上手側で汀線がほぼ安定状態に至っていると考えられる場所において，汀線への法線を立ててその方向角より卓越波向を推定した．**図-2**に示した区域3においては，L型突堤の上手側直近でほぼ安定した汀線形状が得られているので，L型突堤と5号HL間のほぼ中央において直線状汀線に法線を立て，その方向角を読み取るとN143° Eとなった．よって卓越波向はほぼこの方向角で与えられる．一方，宇多ら[4)5)]は，清水海岸のL型突堤より北側区域の海浜変形の再現計算を行い，その区域での卓越波の入射方向をN147° Eとすれば地形変化の再現が可能とした．この場合の卓越波向N147° Eは，L型突堤の上手側で得られたN143° Eよりも4° だけ右回りに傾いている．

同様に，**図-3**の深浅図によれば，4号HLの北東側隣接部では汀線がフック状に後退し，汀線が5号HLへと直線状に伸びていることから，4，5号HLを結ぶ汀線のほぼ中点において汀線に法線を立て，その方向角を読み取るとN138° Eとなる．すなわち，4，5号HL間のフック状汀線に立てた法線の方向角は，L型突堤の南西側隣接部で得られた卓越波向と比べ左回りに5° 傾き，さらにL型突堤の北側区域での卓越波の入射方向N147° Eと比べると，左回りに9° 傾いた方向からとなっている．

このように卓越波が右斜めから入射する条件となっているために，区域3では北向きの沿岸漂砂が発達している．しかしながら，4，5号HL間では，L型突堤方面へと向かう沿岸漂砂があるものの，この間の汀線は南寄りの方向からの入射波の作用を受けて，ほぼ動的安定状態に近づいていたと考えられる．この条件下で，4号HLの北側隣接部の測線No.44, 45間で養浜が行われ，そこで汀線が海側に突出したため，粒径が大きく礫を多く含む投入土砂は，主として前浜に沿って沿岸漂砂により北東向きに運ばれることとなった．

図-3は，2021年12月23日の測量結果を示すが，同様に2022年5月17日，2022年9月26日，および2023年2月17日にも測量結果が得られているので，**図-3**と同じ様式でこれらの時期の海浜形状を**図-5**に示した．これらによれば，4，5号HL間では標高+6 mの平坦面から汀線沖の-5 mまで急斜面が形成されているが，-5 mより沖合では海底勾配が緩くなっている．また養浜に伴い，2022年5月17日にはNo.43, 44付近で汀線付近の等高線が沖向きに緩やかに突出していたが，時間経過とともにこの膨らみは消失している．

図-6には，2021年12月23日の海浜形状を基準とした地形変化量を深浅図に重ねて示す．まず，2022年5月17日までの地形変化では，**図-6(a)**に示すように，測線No.44, 45で行われた養浜により，汀線に沿って-4 m以浅で集中的な堆積が起きた．土砂は，ほぼ4号HLに隣接するNo.44で最も厚く堆積し，北東側に300 m離れたNo.42に至るまでの区域で三角形状に近い形で堆積した．養浜土砂

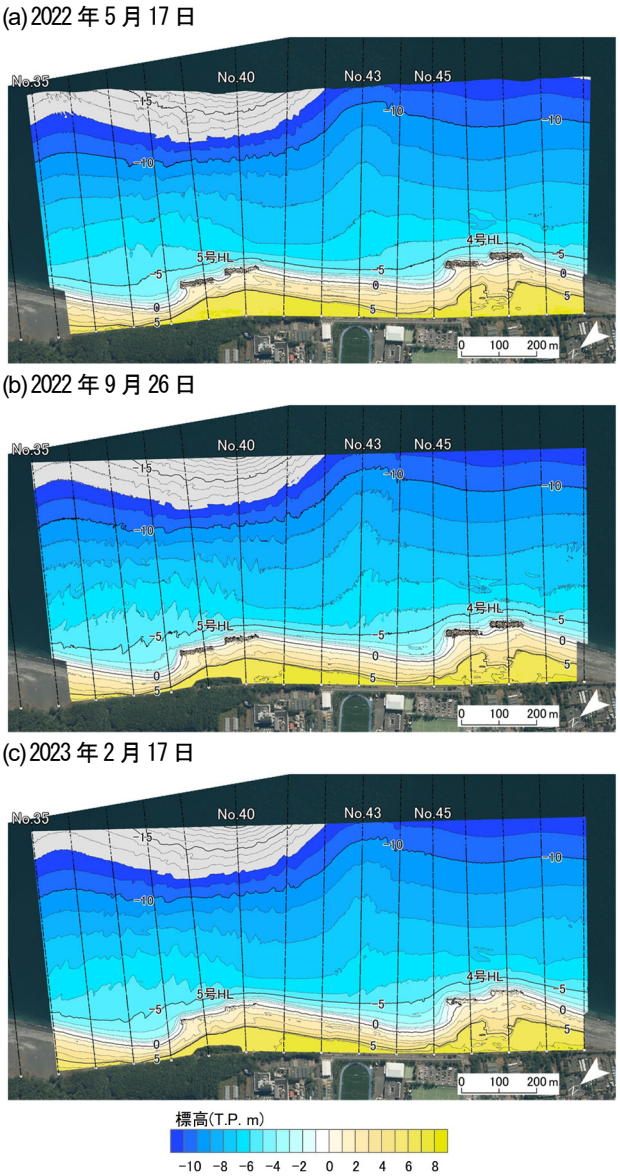

図-5 4,5号HL付近の深浅図（2022年5月17日，9月26日，2023年2月17日）

は，汀線から-4 mまでの急勾配斜面に沿って帯状に堆積し，沖合への流出量はごくわずかであった．この理由は，養浜材料の中央粒径が20 mmと大きいため平衡勾配が大きく，汀線付近の急勾配斜面に押し付けられるように投入土砂が堆積したことによる．この間，4号HLや5号HLの先端部近くでは局所的な侵食も起きている．

次に，2022年5月17日から132日経過後の2022年9月26日の海浜形状と地形変化量の分布を**図-6(b)**に示す．この間，**表-1**に示したように，8月13日には台風8号に伴う有義波高4.36 m（周期9.7 s）の高波浪の作用を受けている．この結果，4号HLの北東側隣接部での集中的な堆積域が北東側へ広がり，堆積域の北端はほぼ5号HLと繋がり，堆積域の中心はほぼNo.43へと200 m北東側へと移った．これは台風8号に伴う高波浪が汀線への法線に対して右回りの方向から入射し，北東方向への沿岸漂砂が発達したことによる．さらに2023年2月17日までには，堆積域は北東側へ移動し，5号HLの南側隣接部に堆積し，5月17日には厚く砂が堆積していたNo.43～No.45での堆積域はほぼ消失した（**図-6(c)**）．

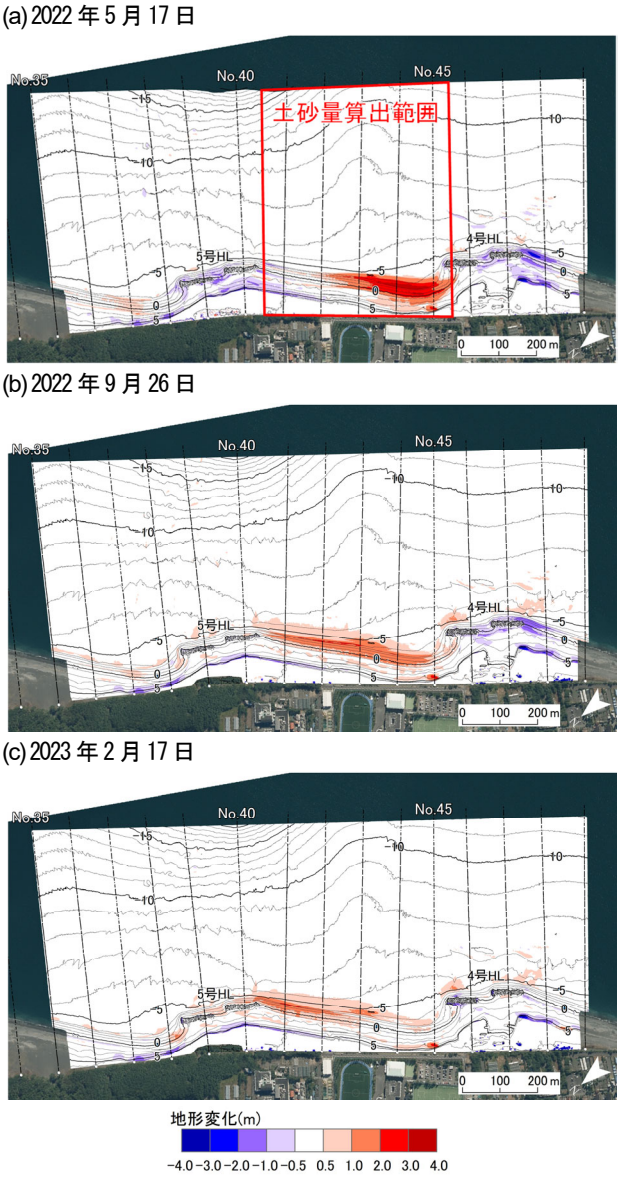

図-6　4, 5号HL付近での地形変化量の平面分布（2021年12月基準）

次に海浜土砂量の変化に着目した解析を行った．**図-6**を基に，4号HLを横断するNo.45＋50 mより5号HL近傍のNo.40＋50 mまで，沿岸方向に500 m区間の総堆積量を時期ごとに算出した結果，2021年12月23日の海浜形状を基準とすると，2022年5月17日までに土砂量は3.8万 m^3増加した．投入土砂量は2.75万 m^3なので，この間4号HLを超えて試験区域に少なくとも1.05万 m^3の土砂が流入したと考えられる．さらに2022年9月26日までには4.9万 m^3の土砂量の増加であったから，この時までにはさらに1.1万 m^3の土砂流入があったと考えられる．しかし2023年2月17日までには初期と比べた土砂の増加量は2.8万 m^3となり，ピーク時と比べて2.1万 m^3だけ土砂量が減少し，投入土砂量に見合った土砂量となった．すなわち，増減を繰り返したものの，土砂投入から約1年が経過した段階でも投入土砂量に見合った土砂が残存し，堆積箇所に違いは見られるものの，4, 5号HL間全体では養浜効果が発現されていることが分かった．

養浜は，2022年1月～4月に行われたことから，2022年5月17日までの総増加土砂量3.8万 m^3のうち74%（2.8万 m^3）は養浜土砂が寄与している．これらの差（1万 m^3）は上手側の4号HLを回り込んで運ばれてきた沿岸漂砂が堆積したものと考えられる．その後，2022年9月26日までに総土砂量は4.9万 m^3まで増加したが，この増加分（1.1万 m^3）も，2022年5月17日～9月26日の間に上手側から沿岸漂砂により土砂が運び込まれたことに起因すると考えられる．しかし，2022年9月26日以降，2023年2月17日までには2.1万 m^3の土砂が消失した．**図-4**によれば，この間波浪はそれ以前と比較して比較的静かな状態が続いていたが，そのような波浪条件であっても上手側の4号HLと5号HLを回り込む沿岸漂砂量の均衡が取れていないため土砂量が徐々に減少したと考えられる．

次に，各時期の深浅図より地形変化量を算出した結果を**図-7**に示す．2022年5月17日～9月26日では，4号HLの北東側隣接部より投入土砂が運び去られた，そこから北東方向へ運ばれた土砂は，5号HLの南側隣接部に一部堆積したものの，大部分は5号HLを回り込んで北東方向へと運ばれた（**図-7(a)**）．続いて2022年9月26日～2023年2月17日では養浜に伴う土砂堆積域はほとんど消失し，4号HLの南側に一部の土砂が残され，養浜前の海浜形状に近づいた（**図-7(b)**）．

5.　縦断形変化

深浅測量データを基に，4号HLを縦断する測線No.46

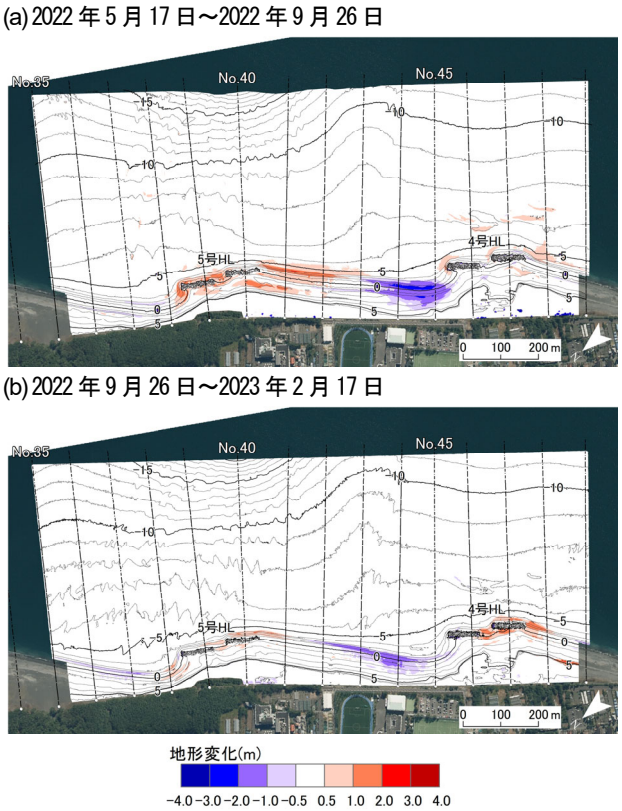

図-7　4, 5号HL付近での地形変化量の平面分布（各測量時期間）

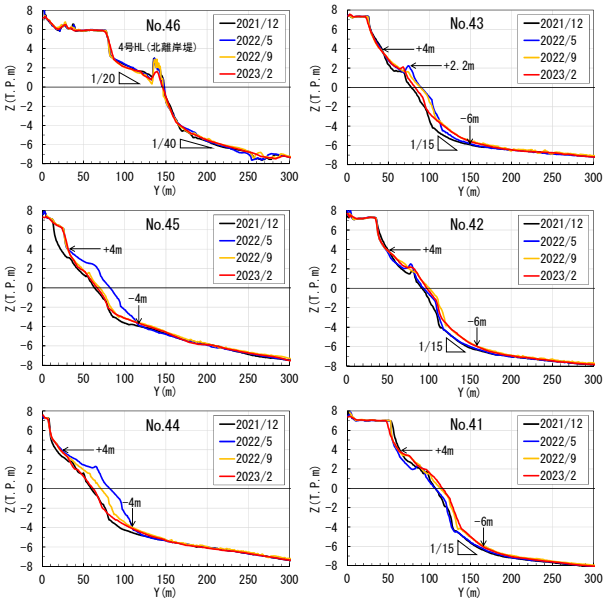

図-8　測線No.46～No.41における縦断形変化

から5号HLを横断するNo.41において養浜前後での海浜縦断形について調べた．No.46～No.41の縦断形変化を**図-8**に示す．No.46は4号HLを横断する測線で，離岸堤の陸側には+6 mの平坦面が残されており，この平坦面から+3 mまで急勾配で落ち込んだ後，そこから離岸堤の背後へと1/20勾配の斜面となっている．離岸堤の沖側では1/40勾配で落ち込み，そこでは観測期間中縦断形変化はほとんど起きていない．No.45では，養浜により2022年5月17日までに汀線が19 m前進し，-4 m～+4 m間で断面がほぼ平行移動しつつ前進した．同様な特徴はNo.44でも見られ，この測線では汀線の前進量が23 mと最も大きい．養浜により2022年5月17日までに土砂が堆積したが，2022年9月26日までには堆積量のほぼ1/2が消失した．これらの縦断形変化では地形変化は-4 m以浅で集中的に起きており，沖浜ではほとんど地形変化が起きていないことが特徴である．

No.44の北東側に隣接するNo.43は，養浜区間から外れており，投入土砂が波の作用で運ばれてきている測線であるが，そこでは汀線近傍に+2.2 mのバームを形成しつつ土砂が堆積したことが分かる．また土砂投入域の測線No.45, 44では堆積域の沖端水深は-4 mであったが，No.43では沖端水深が-6 mまで増加し，沖浜勾配が1/20と緩勾配をなして堆積している．同様な特徴がNo.42, No.41でも観察され，これらの測線では-6 mまで1/15勾配と相対的に緩い勾配で堆積したことから，そこでは主に砂質分が堆積したと考えられる．

6.　現地状況

2023年4月25日，4，5号HL間の海浜状況を確認するための現地調査を行った．前出の**図-2**には写真撮影地点（St.1～St.3）を示す．現地調査では，4，5号HL間のほぼ中央より汀線に達し，そこから5号HLの背後まで北東方向に移動しつつ海岸状況を調べた．まず，St.1から南向きに4号HLを望んだのが**写真-1(a)**である．調査当日，4号HLの北側隣接部では新たな盛り土養浜が行われつつあり，汀線より陸側にT.P.+6 mの平坦面をなして盛り土が行われていた．

養浜盛り土ののり先に達し，St.2から南西向きに4号HLを望んだのが**写真-1(b)**である．1/2勾配と，急勾配の盛り土斜面ののり先が波の作用で削り取られ，盛り土ののり先には比高約1 mの浜崖が形成されていた．また，浜崖部分では，砂質分が運び去られた結果，大礫が残されのり先を覆っていた．一方，その沖の汀線付近にはよく淘汰された粒径が小さな礫が堆積していた．このように，盛り土養浜では汀線から波の遡上域に浜崖を形成しつつ土砂が削り取られていたが，粒径に応じた淘汰が進みつつ土砂流出が起きていた．

次に，養浜盛り土を背にして，St.3のバーム頂より北東方向を望んだのが**写真-1(c)**である．**図-8**の縦断形変化に示したように，汀線の陸側近傍にはT.P.+2.2 mの高さのバームが形成され，このバームは5号HLに至るまで直線状に伸びていた．バーム背後は大礫が集中的に堆積した下り斜面となっていたが，その陸側では再び陸向きに緩やかに標高の高まる斜面が形成されていた．

写真-1　4, 5号HL間の海浜状況（2023年4月25日）

7.　汀線と海浜断面積変化量の分布と漂砂の移動高

図-9,10には2021年12月23日の初期形状を与えて，縦断形変化から定めた海浜断面積の変化量ΔA（水深6 m以浅での海浜断面積変化量）と汀線変化量Δyの沿岸方向分布を示す．2022年5月17日までに養浜により，No.44において海浜断面積と汀線変化量がピークを示したが，その後時間経過とともに両者のピーク位置が北東側の測線へと移り，それらの絶対値が減少したことが分かる．ΔAとΔyはよく似た変化を示すことから，**図-11**には両者の関係を示す．これによれば，$R^2=0.92$で$\Delta A=8.0\ \Delta y$が成立している．すなわち，投入土砂は主として沿岸漂砂の作用により，海浜に押し付けられるようにほぼ平行移動しつつ，漂砂の移動高8 mを保ちつつ北東方向へ運ばれたことが分かる．

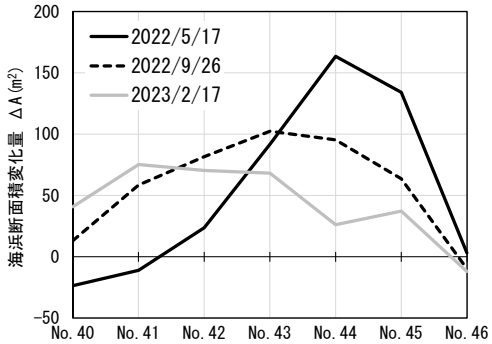

図-9　海浜断面積変化量ΔAの沿岸分布（2021年12月基準）

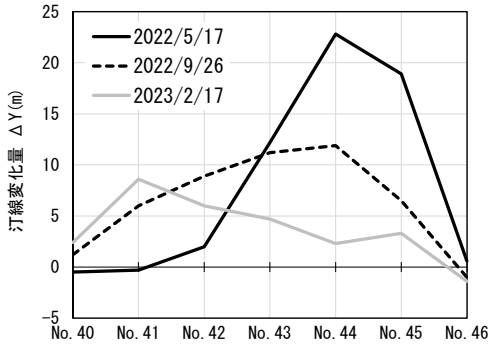

図-10　汀線変化量Δyの沿岸分布（2021年12月基準）

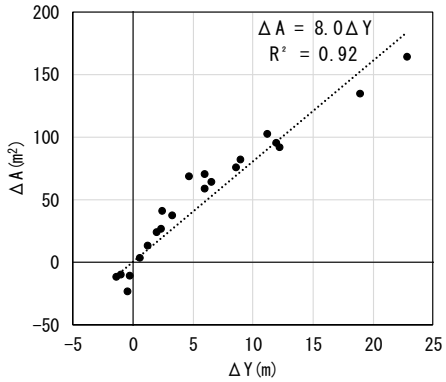

図-11　海浜断面積変化量ΔAと汀線変化量Δyの相関（2021年12月基準）

8.　まとめ

清水海岸の4，5号HL付近では北東向きの沿岸漂砂が卓越しており，ほぼ水深4 mから陸上部の+4 m間において砂礫が汀線と平行に運ばれている．現況で4号HLの下手側にはフック状汀線が形成されており，そこは海岸保全上の弱点となっている．この付近で養浜を行ったところ，養浜砂は投入箇所（砂浜些少域）にはとどまらず，下手側の5号HLを越えて東側へと緩やかに運び去られた．このことより，上手側から沿岸漂砂により砂が運ばれてきた場合，砂浜些少域での汀線前進は一時的で，砂礫は4, 5号HL付近を通過して下手側へと運び去られることが確認された．また，2022年1月～4月実施の養浜では，養浜箇所での効果は2023年2月17 日までの10か月間でほぼ失われた．すなわち，4, 5号間の砂浜が狭い場所での養浜の効果を期待できる期間は，約1年と短いことが分かった．このように，約3万 m³の土砂投入であってもその有効期間は約1年であり，上手側からsand bodyの移動とともに大量の土砂が運び込まれるまでの間，養浜を繰り返さざるを得ないのが現状である．

REFERENCES

1) Uda, T.: Japan's Beach Erosion - Reality and Future Measures, 2nd ed., World Scientific, p. 530, 2017.
2) 宇多高明, 住田哲章, 内山翔太, 居波智也, 五十嵐竜行, 伊達文美：清水海岸における sand body の移動阻害要因の検討，土木学会論文集（海洋開発），Vol.79，No.18，2023．[Uda, T., Sumita, A., Uchiyama, S., Inami, S., Igarashi, T. and Date, A.: Blockage of continuous movement of a sand body on Shimizu coast, *Journal of Japan Society of Civil Engineers* (*Ocean Engineering*), Vol. 79, No. 18, 2023.]
3) 宇多高明，住田哲章，内山翔太，三波俊郎，伊達文美：清水海岸における sand body の移動とその阻害要因の検討，土木学会論文集（海岸工学），Vol.79，No.17，2023．[Uda, T., Sumita, A., Uchiyama, S., Sannami, T. and Date, A.: Blockage of continuous movement of a sand body on Shimizu coast, *Journal of Japan Society of Civil Engineers* (*Coastal Engineering*), Vol. 79, No. 17, 2023.]
4) 宇多高明, 内藤慎也, 住田哲章, 五十嵐竜行, 芹沢真澄：清水海岸における集中的盛り土養浜の効果検討, 土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.78，No.2，pp.I_427–I_432，2022．[Uda, T., Naito, S., Sumita, A., Igarashi, T. and Serizawa, M.: Study on effect of concentrated beach nourishment on Shimizu coast, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, *Ser. B2* (*Coastal Eng.*), Vol. 78, No. 2, pp. I_427–I_432, 2022.]
5) 宇多高明，住田哲章，内山翔太，五十嵐竜行，村田昌樹：三保松原砂嘴の変形予測と大規模サンドリサイクルの効果検討，土木学会論文集（海岸工学），Vol.79，No.17，2023．[Uda, T., Sumita, A., Uchiyama, S., Igarashi, T. and Murata, M.: Prediction of deformation of Mihono-Matsubara sand spit and effect of large-scale sand back pass, *Journal of Japan Society of Civil Engineers* (*Coastal Eng.*), Vol. 79, No. 17, 2023.]

(Received March 14, 2024)
(Accepted July 18, 2024)

FIELD OBSERVATION OF BEACH CHANGES AFTER BEACH NOURISHMENT NEAR HEADLAND NOS. 4 AND 5 ON SHIMIZU COAST

Takaaki UDA, Hiroshi UMEHARA, Naoya SUGIMOTO, Yui TAKEUCHI and Sakura ISHIBASHI

On the Shimizu coast, it was not confirmed whether or not northeastward longshore sand transport prevailing along this coast can smoothly reach the north end of the coast, because artificial headlands have been installed on the coast. Therefore, 2.75×10^4 m^3 of sand (d_{50} = 2 cm) excavated from the riverbed of the Abe River was experimentally nourished between artificial headland Nos. 4 and 5 in January 2022, and subsequent movement of the sand was observed by NMB and UAV surveys four times. It was found that nourishment sand was mainly deposited in a zone shallower than -4 m until May 2022, and the sand deposition zone near headland No. 4 moved northeastward by 200 m by September 2022. The entire volume of deposited sand between headland Nos. 4 and 5 until May 2022 was 3.8×10^4 m^3, and the volume of nourishment sand was 74% of all the nourishment sand. Moreover, the nourishment sand was transported while maintaining the characteristic height of beach changes of 8 m. Even though there exist headlands, sand was gradually transported alongshore while passing through the HLs.