土木学会論文集, Vol.80, No.17, 24-17134, 2024.

漂砂バランスの崩れに起因する 清水海岸4号消波堤北側での侵食の実態

宇多　高明[1]・梅原　裕[2]・杉本　直弥[3]・竹内　由衣[4]

[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 (Corresponding Author)

北向きの沿岸漂砂が卓越する清水海岸のL型突堤～4号消波堤間（消波堤区間）では，景観に配慮しつつ侵食対策が進められてきており，とくに既設1号突堤と新設予定の2号新堤周辺の地形変化に注目した検討が行われている．一方，消波堤区間の北端に位置する4号消波堤の下手側では，養浜が行われてはいるものの，沿岸漂砂量の減少により徐々に侵食が進んできており，消波堤区間では養浜により浜幅が大きく広がったのと対照的に，汀線後退が受容できない水準に近づいている．本研究では，消波堤区間と4号消波堤北側での地形変化の相違に着目しつつ，4号消波堤付近での侵食の実態について調べ，その上で今後の侵食対策では養浜の継続が必要なことを明らかにした．

Key Words : *beach erosion, Shimizu coast, breakwater, longshore sand transport, shoreline change*

1.　まえがき

駿河湾の北端には三保松原砂嘴が伸びている（**図-1**）．この砂嘴の外縁をなす清水海岸では，景観を改良しつつ漂砂を制御するために既設消波堤の改良が行われており，まず2019 年2月までに1号突堤の建設が進められた[1]．その後，2019年10月12日に襲来した台風19号時の高波浪の作用により，1号突堤の北側隣接部において汀線が著しく後退したこと[2]から，BGモデル（Bagnold概念に基づく3次元海浜変形予測モデル）により，1号突堤周辺の地形変化の再現計算が行われ，2号新堤の最適配置形状の検討が行われた．同時に，堤防前面に投入された土砂の広がり状況を正確に予測可能な土砂の湧き出し方式が提案され[3]，それによる地形変化予測も行われた．このような検討の一方，清水海岸の4号消波堤から砂嘴先端に至る区間では，**図-1**に模式的に示すように，北向きの沿岸漂砂により運ばれた砂が急勾配の海底斜面を経て深海へと落ち込んでおり，侵食対策上，砂の質量欠損を減じることが必要とされている．このため，砂の有効活用の一環として，砂嘴先端部で毎年5万 m^{3}の砂礫を採取し，それを清水海岸での養浜に利用するサンドリサイクルも継続的に行われている．これらの検討の中心は，L型突堤～4号消波堤間（消波堤区間）のうち，とくに既設の1号突堤と新設予定の2号新堤周辺の地形変化にあった．これに対し，消波堤区間の北端に位置する4号消波堤の背後では養浜が行われてきてはいるものの，徐々に侵食が進み，消波堤区間で養浜により浜幅が大きく広がったのと対照的に，漂砂供給量の減少による汀線後退が受容できない水準に近づいている．そこで本研究では，消波堤区間と4号消波堤北側での地形変化の相違に着目しつつ，

図-1　三保松原砂嘴と清水海岸の位置

4号消波堤下手側での侵食の実態を明らかにした上で今後の侵食対策法について検討した．

2. 清水海岸に関する既往研究

藤原ら[1]は，2019年10月12日襲来の台風19号（T1919号）に伴う高波浪の作用により，清水海岸で著しい被害が出たことを明らかにした．この台風は，2019年10月12日に御前崎沖を通過し，伊豆半島に上陸した後関東平野を横断したものであり，久能沖波浪観測所では最大有義波高9.86 m（周期14.9 s）を記録した．また気象庁清水港験潮所の観測によれば，潮位はT.P.+1.63 mを記録し，T1721号時の最高潮位T.P.+1.50 mを更新し，潮位偏差は0.91 mに達した．この台風時の高波浪により，この時までに造られていた1号突堤の北側隣接部で著しい汀線後退が起き，保全上必要な浜幅80 mを大きく割り込んで浜幅が20 mまで狭まり，また天端高T.P.+12 mの海岸堤防への越波も起きた[1]．さらに重量50t型の異形ブロックで造られていた2号消波堤ではブロック散乱が著しかった．

その後，内藤ら[2]は，**図-1**に位置を示す清水海岸について，まず2003～2020年取得の空中写真や深浅測量データより，長期的な地形変化について調べた．また，L型突堤の北側に設置されている1号突堤の背後で行われた盛り土養浜の効果についても検討している．この沿岸の侵食対策としては，T1919号直後の2019年11月から2021年7月までに，消波堤区間において三保松原先端部からのサンドリサイクルにより調達した土砂10.1万 m^3と，安倍川河道の採取土砂3.3万 m^3，合計で13.4万 m^3の土砂による集中的な養浜が行われ，後退した汀線の前進が図られた．この時の養浜では，砂がトラック輸送され，堤防前面での盛り土養浜方式が採用された．これにより1号突堤の北側隣接部に形成されたフック状汀線の回復が図られた．しかしながら，このような養浜土砂も清水海岸北端部付近において沖向きに落ち込んでいることから，土砂損失を防止しつつサンドリサイクルを行う手法を見出すことが急務とされた．さらに，消波堤区間の北端に位置する4号消波堤の北側隣接部では，汀線がフック状に後退し，その後退量は最大100 mに及ぶとした．しかし4号消波堤北側隣接部での侵食に対する検討は十分行われていない．

次いで，宇多ら[3]は，堤防前面での養浜盛り土に伴う地形変化を正確に表現可能な土砂の湧き出し方式を考案し，これをBGモデルに組み込んだ上で2号新堤が建設された条件でT1919号と同等の高波浪が作用した場合の地形変化予測を行った．この結果，景観改良のために行う予定の既設2号消波堤の段階的撤去とともに，長さ80 mの2号新堤（北）（南）を配置し，年間8万 m^3の養浜を行えば清水海岸の目標浜幅80 mが達成できるとした．この計算の対象領域は消波堤区間であり，4号消波堤の北側隣接部での地形変化は計算対象外であった．

さらに，宇多ら[4]は，三保松原砂嘴先端部での土砂損失を防ぎつつ砂礫の採取を行い，それを養浜に有効利用する方法について検討した．まず，BGモデルにより2010年9月～2021年11月に生じた砂嘴周りの地形変化を再現してモデルの妥当性を確認し，その上でこのモデルを用いて砂嘴先端部より5万 m^3/yrのサンドリサイクルと，一括採取した25万 m^3の砂礫を上手海岸へ運んで養浜する方法について検討した．計算では，波高3.0 m, 周期9.0 sの5%出現頻度波浪が設定された．計算結果によれば，2010～2021年の汀線変化はうまく再現されたが，一括掘削を行ったとしても砂嘴先端部の急勾配の海底斜面を経た土砂落ち込みは続き，大規模掘削の効果は掘削穴が埋め戻される時期までであって，その後は効果が低減することが明らかにされた．一方，現況から5年後までの地形変化予測では，4号消波堤の北側隣接部ではさらに侵食が進むことが示された．以上のように消波堤区間での大規模養浜に時間を要している間にも，4号消波堤の北側隣接域での侵食は単調に進み，そのまま放置することが危険な状態に近づいている．

3. 空中写真に基づく汀線変化解析

内藤ら[2]は，2003～2020年取得の清水海岸の空中写真を示し，これらの空中写真をもとに汀線変化解析を行った．調査期間の最終時期に近い2019年10月12日には，T1919号に伴う高波浪が清水海岸に作用し，それまでに設置されていた1号突堤の北側隣接部で著しい汀線後退が起きた．そこで養浜が行われた結果，1号突堤の北側隣接域では養浜により砂浜が回復したものの，消波堤区間の北端に位置する4号消波堤の北側隣接部では，2019～2020年に11,800 m^3，2020～2021年に10,600 m^3の養浜が行われたにも関わらず，単調に侵食が進んできている．このことから，ここではT1919号による高波浪作用後の地形変化に注目し，内藤ら[2]の示した2003～2020年の空中写真に2022年10月と2023年12月撮影の空中写真を新たに加えて解析を進めた．またNarrow Multi-Beam（NMB）測量結果をもとにした地形変化解析も行った．

まず**図-2**には2003, 2017, 2019年の空中写真と，2019年12月実施の測量による深浅図を示す．これらの図にはいずれの場合にも**図-2**に示した2003年1月の空中写真から定めた汀線形状も示す．2003年には，南端部のL型突堤と1号消波堤の北側隣接部を除きほぼ南北方向に緩く湾曲した汀線が連続的に伸びていたが，2017，2019年には1号突堤とその北側の4号消波堤の北側直近で汀線がフック

状に後退した．また，4号消波堤北側の侵食区域は時間経過とともに北側へと広がった．さらに，台風19号直後の2019年12月の深浅図に示すように，4号消波堤の北側隣接部の侵食域では，-10 m以浅で侵食が進み，侵食域には侵食平坦面が形成された．一方で2～4号消波堤間の汀線は2003年当時の汀線と大きな変化はなかった．

同様に，**図-3**には2020～2023年に取得された4時期の空中写真を示す．2020年までには1号突堤と2号消波堤に挟まれた200 m区間では浜幅が20 mまで狭まっていたが，2021年までに2号消波堤が従来の重量50tから64tのブロックに変えて復旧された上，養浜も行われたために浜幅が65 mまで広がった．しかし2, 3, 4号消波堤の北側では2021年以降2023年まで汀線のフック状の後退が続き，汀線後退量は北側に位置する消波堤の下手側直近ほど大きくなり，とくに4号消波堤の北側直近の測線No.15では2020～2023年に汀線が16 mも後退し，浜幅が80 mまで狭まった．一連の汀線変化は北向きの沿岸漂砂のバランスが失われたことを示している．

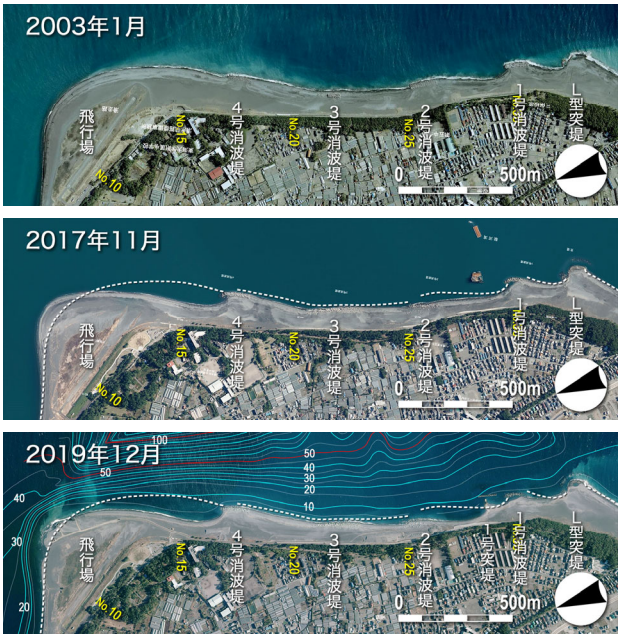

図-2　清水海岸の空中写真（2003, 2017, 2019年）

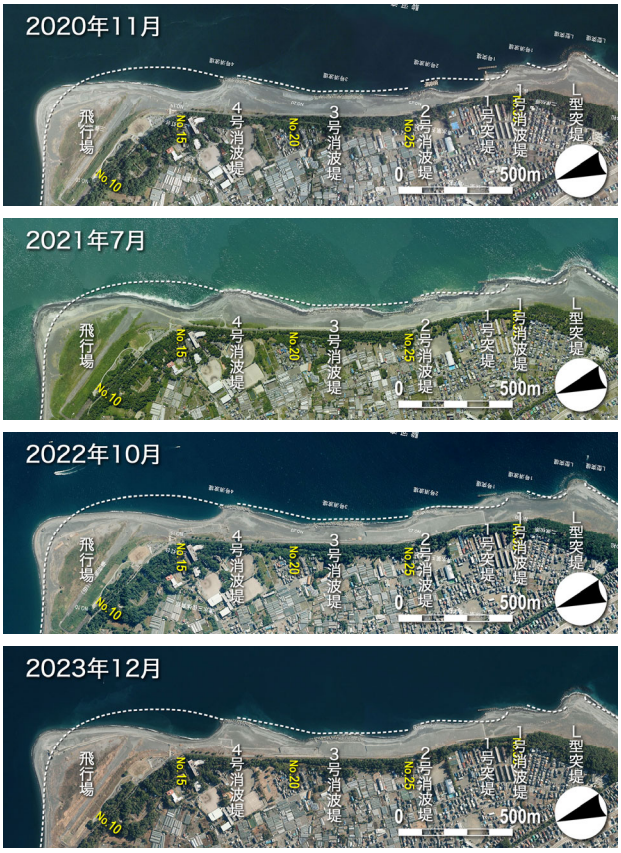

図-3　清水海岸の空中写真（2020, 2021, 2022, 2023年）

図-4は2019年11月の汀線を基準としたT1919号後の汀線変化を示す．2020年11月から2021年11月の間に1号突堤と2号消波堤の間では13.4万 m^3の養浜が行われたため，汀線がX = 14～14.6 km間で釣鐘状に最大50 m前進した．汀線の前進は，養浜が行われた上，復旧された2号消波堤が北向きの沿岸漂砂を阻止していることによるものであり，2号消波堤の南側では急速に汀線前進が起きた．その後，2022, 2023年と時間経過とともに2号消波堤近傍では汀線がさらに前進した．これと対照的に，2号消波堤の北側区域では全体的に侵食傾向となり，とくに3号，4号消波堤の北側隣接部では汀線が明らかに後退傾向を示す．

T1919号後の汀線変化を2021年11月の汀線を基準として調べたのが**図-5**である．この間，汀線の前進後退量は小さいものの，2号～3号消波堤間では堆積傾向であるのに対し，4号消波堤の直下手では汀線が後退しており，2号消波堤による沿岸漂砂の阻止と同期して4号消波堤の

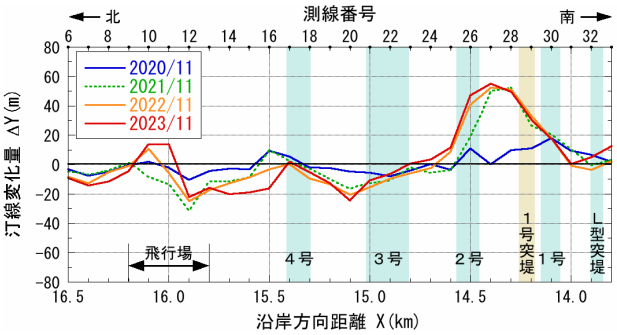

図-4　T1919号後の汀線変化（2019年11月基準）

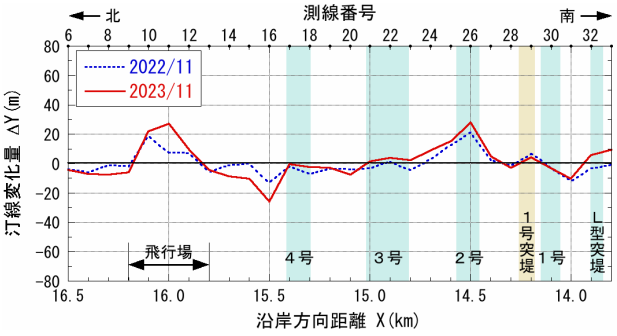

図-5　T1919号後の汀線変化（2021年11月基準）

北側隣接部での汀線後退量が増加しており，漂砂上手側に造られた2号消波堤の影響が4号消波堤の北側にまで及んでいる．これらとは独立して飛行場付近では堆砂が続いている．

4号消波堤の北側隣接域を通る測線No.15では近年汀線が著しく後退し，浜幅が急速に狭まってきており，越波も危惧される状態に近づいていることから，**図-6**にはNo.15における浜幅の経年変化を示す．これによると，2000年から2007年までは浜幅は200 mの一定値を保っていたが，それ以降汀線の後退が顕著となり，2017年までには浜幅は105 mとほぼ半減した．その後2020年までには浜幅の低減速度は小さくなり，約100 mの浜幅が維持されたが，2号消波堤が改修されて以降再び浜幅の低減傾向が強まり，2023年には浜幅は80 mまで減少した．

4. 4号消波堤北側の地形変化と侵食対策

2022年12月と2023年12月には清水海岸北部を対象にNMB測量が行われ，三保松原砂嘴の周辺の詳細地形が明らかにされた．これら2時期の深浅測量の結果を測線配置とともに**図-7**に示す．これによれば，4号消波堤の北側直近では汀線がフック状に後退しているが，4号消波堤の背後では2019～2021年に22,400 m^{3}の土砂による盛り土養浜が行われた．汀線付近の等高線形状に着目すると，4号消波堤の直背後では+6 mの高さまで盛り土養浜が行われていたが，その前面に浜崖が形成された．また，2時期の深浅図を比較すると，盛り土養浜区間で盛り土の天端と汀線の間にできた急勾配斜面（浜崖）が汀線の後退とともに後退したことが分かる．一方，三保松原砂嘴の先端部では土砂落ち込みのために急斜面が形成されている．

2022, 2023年の深浅図より両者の差を求めた結果を**図-8**に示す．4号消波堤の北側直近の-6 m以浅と盛り土が削り取られ，その砂が砂嘴の北端へと運ばれ，深海へと落ち込んだことが分かる．ここで**図-8**に破線で示す領域A_eの侵食土砂量（盛り土侵食も含む）は3.3万 m^{3}であった．一方，領域A_aの堆積土砂量は4.2万 m^{3}であり，侵食量より堆積量が大きいことから，4号消波堤の北側隣接部だけでなく，南側から沿岸漂砂により運ばれてきた砂礫0.9万 m^{3}も安息勾配斜面へと落ち込んだことが分かる．**図-9**には観測期間の2022～2023年に久能沖での波浪観測結果を示すが，この間，波浪は春季（4～6月），夏季（8月）および秋季（11月）に高まっている．そこで例えば，高波浪の閾値を3 mとすると，これを超えた波浪は2023年8月14日の$H_{1/3}$=3.64 m，2023年11月7日の$H_{1/3}$=3.28 mの波浪のみであり，ほぼ通常波浪の作用によりこのような地形変化が起きたことが分かる．

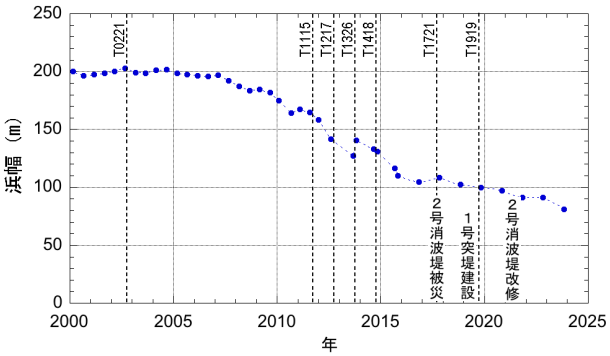

図-6 測線No.15における汀線の経年変化（2000～2023年）

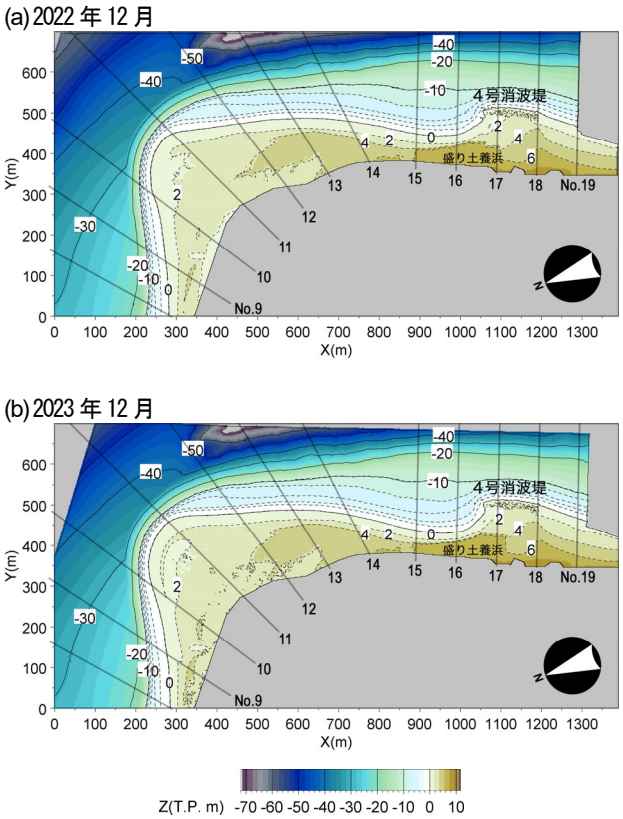

図-7 NMBおよびUAV測量による三保松原砂嘴北端部の地形（2022年と2023年）

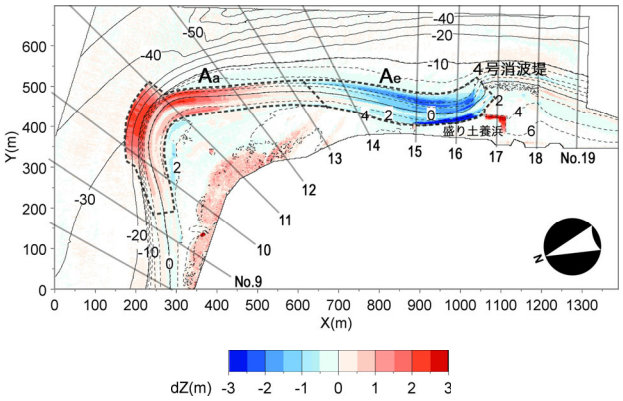

図-8 2022～2023年の地形変化量と堆積・侵食領域の区分

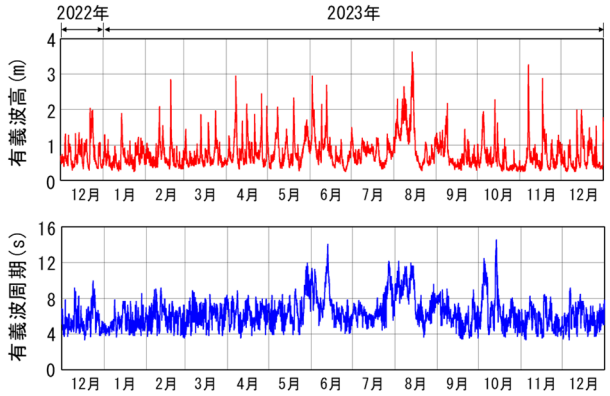

図-9 清水海岸の久能沖での波浪観測結果（2022年12月～2023年12月）

図-8に示すように，消波堤区間の北端に位置する4号消波堤の北側隣接域では侵食が進んできており，2023年12月時点での浜幅は最も狭い箇所で80 m未満と，保全上必要な浜幅が確保されていない．4号消波堤を回り込んで0.9万 m^3の土砂が南側から沿岸漂砂により運ばれてきてはいるが，この沿岸漂砂では4号消波堤北側のフック状の汀線後退を止め，前浜の復元を行うことができない．したがって，4号消波堤の北側直近での著しい侵食を防ぐには，養浜の継続実施が必要と考えられる．

5. 縦断形変化

消波堤区間を通る測線No.31, 28, 25, 20におけるT1919号後の縦断形変化を**図-10**に示す．まずL型突堤と1号突堤間を通るNo.31では，2019～2021年には縦断形はほぼ一定形状を保っていたが，2022年までにほぼ-8 m～+2 m間が削られ，汀線が10 m後退した．しかし，その後2023年までは地形は同じ形状を保った．これに対し，2号消波堤上手側のNo.28では，2019, 2020年までは汀線付近の勾配が1/8であったが，天端高が+6 m（2021年）ないし+7 m（2023年）の盛り土養浜が行われ，土砂が海側に押し出されたことにより1/5の急勾配斜面が形成され，急斜面の先端は通常時には地形変化が起きない-12 mにまで達した．さらに縦断形の先端付近では1/3と急勾配で土砂が落ち込んでいる．このように養浜土砂の押し出しを行うと，通常の漂砂帯の沖まで砂礫が落ち込むことが分かる．

2号消波堤の直下手側を通るNo.25では，養浜により天端高+7 mの盛り土が形成されたのみでなく，+2 m～-5 m間で堆積が起きている．これらの堆積断面と比較して，3号消波堤の下手側直近のNo.20では，2021年以降2023年までに+2 m～-9 m間が削り取られ，侵食前の鉛直上方に凸状の縦断形がやや凹状へと変化している．測線No.20

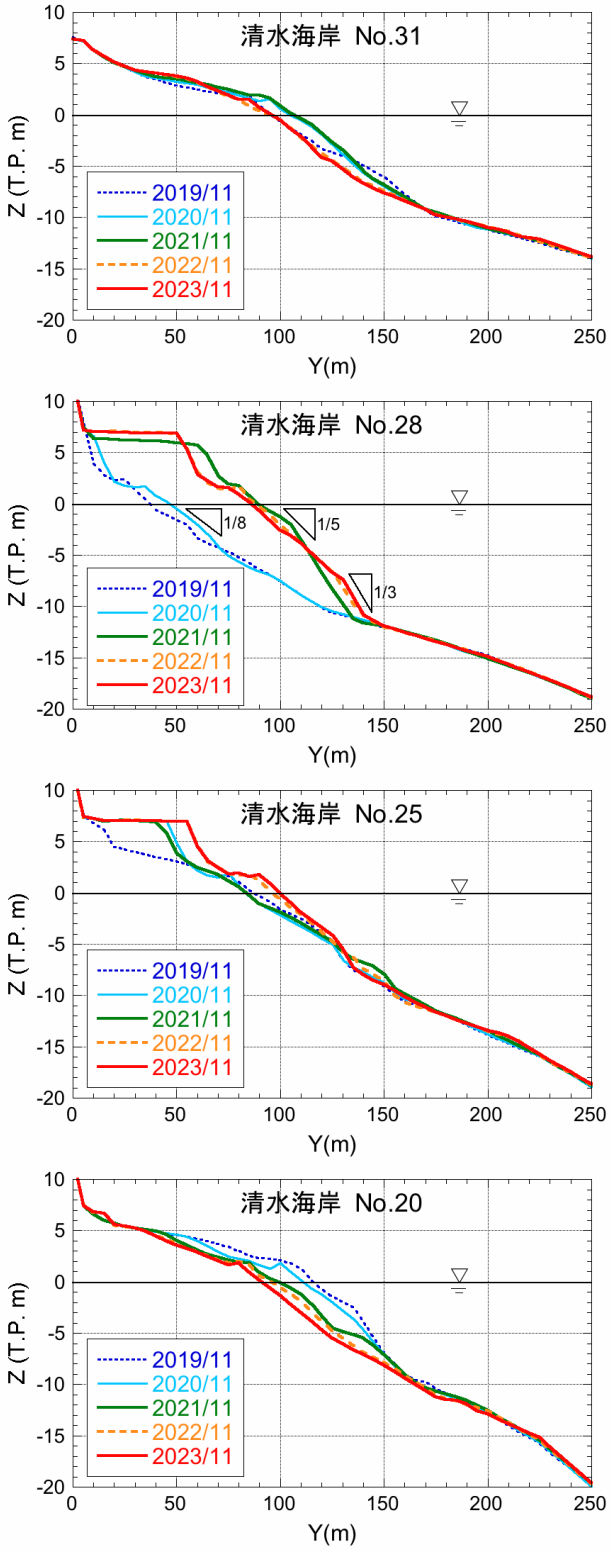

図-10 T1919号後のL型突堤～4号消波堤間の縦断形変化（測線No.31, 28, 25, 20）

は2, 3号消波堤の北側に位置しているが，これらの消波堤による沿岸漂砂の阻止効果が高すぎるために漂砂バランスが崩れて汀線が後退したと考えられる．

さらに**図-8**に示す4号消波堤の北側隣接部を通る測線No.16, 砂嘴の先端を挟み込むNo.12とNo.10の縦断形変化を**図-11**に示す．No.16では+6.4 mの盛り土が行われてい

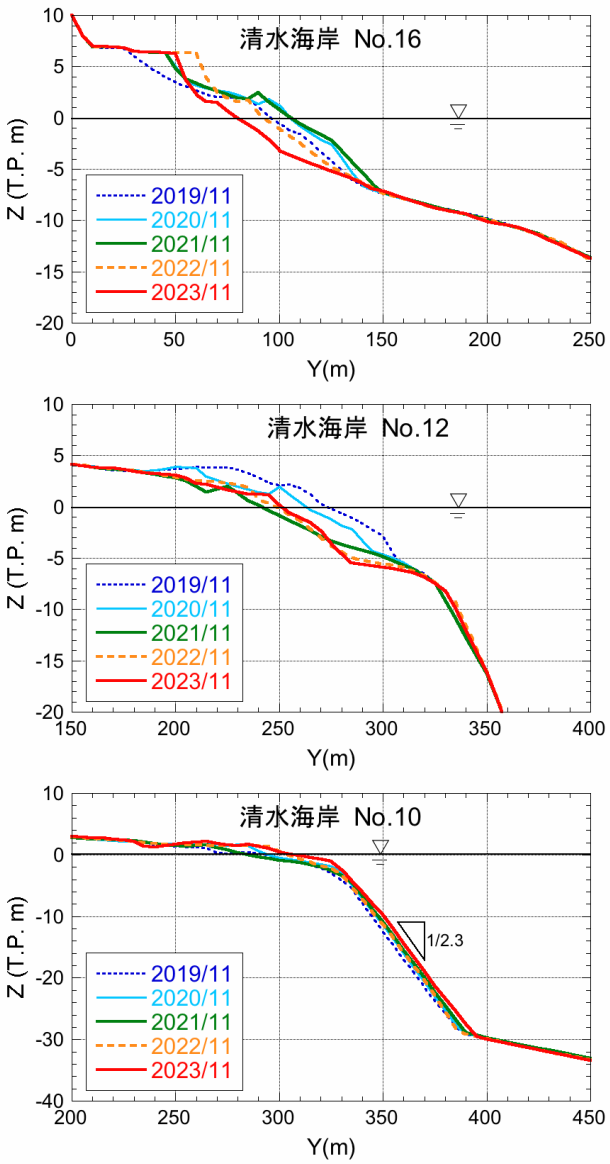

図-11 T1919号後の4号消波堤～飛行場間の縦断形変化（測線No.16, 12, 10）

るが，その海側端が削り取られて浜崖が形成されている．海面下では2021年以降-7 m～3 m間が削り取られ，この間汀線が25 mも後退した．この測線での地形変化の限界水深はほぼ-7 mにあり，消波堤区間と比べ，浅い部分が削られている．砂嘴の先端部に近づいたNo.12でもほぼ-6 mに平坦面を残しつつこの場合も浅い部分が削り取られている．また，前浜ではサンドリサイクルのための掘削が行われているため地形変動量が大きい．これらに対して，No.10では単調な土砂落ち込みが続き，ほぼ-30 mまで1/2.3の急勾配を保ちつつ土砂が落ち込んでいる．

6. まとめ

消波堤区間（L型突堤～4号消波堤間）では，1号突堤の建設後T1919号時にはその縦堤による沿岸漂砂の阻止効果が強く現れ，縦堤の北側隣接域で著しい汀線後退が生じ，砂浜が極端に減少した場所では堤防からの越波が生じた．このことから侵食対策として，2020，2021年には1号突堤と2号消波堤間で13.4万 m^3の養浜が行われた．さらに同じ台風により2号消波堤の異形ブロックが激しく散乱したため，災害復旧により重量を50 tから64 tに増したブロックを用いて消波堤の復旧が行われた．この結果，消波能力が向上した2号消波堤では，沿岸漂砂の阻止能力が高まり，2号消波堤から1号突堤間では安定した前浜が確保された．一方，消波堤区間の北端に位置する4号消波堤の北側隣接域では侵食が進んできており，2023年12月時点での浜幅は最も狭い箇所で80 m未満と，保全上必要な浜幅が確保されていない．したがって侵食対策としてはこの区域にあっても養浜の継続実施が必要である．

一方，**図-10**に示したように，消波堤区間のNo.28では，汀線から押し出された砂礫は通常時には地形変化が起きない-12 mにまで1/3勾配をなして落ち込んでいたのに対し，4号消波堤北側のNo.12では，- 6 mに棚を形成しつつ断面が後退しているので，養浜砂礫の沖への落ち込み量は少なくできる．したがって見かけ上の汀線変化は消波堤区間と比べて同程度となったとしても，漂砂量自体は小さいので，一定量の土砂による養浜の効果が出やすいという特長がある．また，この付近は砂嘴先端部に近いので深海へと土砂が落ち込みやすいが，**図-8**に示したように，深海への土砂の落ち込み区域は砂嘴北端部のNo.10～No.12が主であり，盛り土養浜区域から約700 mと近いので，輸送コストは低く抑えられる．これらを考慮すれば4号消波堤以北にあっても養浜を行うことが望ましいと考えられる．

REFERENCES

1) 藤原健史，大石一貴，宇多高明：台風 19 号時の高波浪による清水海岸の侵食と越波被害，土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol.76，No.2，pp.I_318–I_323，2020．[Fujiwara, T., Oishi, K. and Uda, T.: Erosion and wave overtopping damages on Shimizu coast due to storm waves associated with T1919, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, *Ser. B3* (*Ocean Engineering*), Vol. 76, No. 2, pp. I_318–I_323, 2020.]

2) 内藤慎也，住田哲章，宇多高明，三波俊郎：清水海岸での新型突堤の建設と集中的盛り土養浜の効果と課題，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.78，No.2，pp.I_487–I_492，2022．[Naito, S., Sumita, A., Uda, T. and San-nami, T.: Construction of new-type groin on Shimizu coast and effect of large-scale beach nourishment, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, *Ser. B2* (*Coastal Engineering*), Vol. 78, No. 2, pp. I_487–I_492, 2022.]

3) 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 Engineering*), Vol. 78, No. 2, pp. I_427–I_432, 2022.]

4) 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），第 79 巻 17 号，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 Engineering*), Vol. 79, No. 17, 2023.]

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

BEACH EROSION NORTH OF NO. 4 BREAKWATER ON SHIMIZU COAST DUE TO DISRUPTION IN BALANCE OF LONGSHORE TRANSPORT

Takaaki UDA, Hiroshi UMEHARA, Naoya SUGIMOTO and Yui TAKEUCHI

In the area between L-shape groin and No. 4 breakwater on the Shimizu coast, measures against beach erosion which reduces minus impact to the scenic beauty of the coast have been taken. To this purpose, detailed investigations have been carried out on the beach changes in the area between L-shape groin and No. 4 breakwater. On the other hand, beach has been eroded over time despite the beach nourishment downcoast of No. 4 breakwater located at the north end of the coast, which is in contrast with the significant shoreline advance upcoast due to the beach nourishment. Thus, the shoreline recession in this area due to decrease in longshore sand transport approaches to the level not to be acceptable. In this study, while comparing the beach changes in the areas upcoast and downcoast of No. 4 breakwater, erosion downcoast of No. 4 detached breakwater was investigated in detail and future measures against erosion were described. It was concluded that appropriate measure is the continuation of beach nourishment downcoast of No. 4 breakwater.