

# ジェットポンプ式サンドバイパスシステム試験運転における土砂輸送及び海底地形モニタリングについて

山田 匠<sup>1</sup>・藤原 剛<sup>2</sup>・田村 勇一郎<sup>3</sup>・片山 裕之<sup>4</sup>

<sup>1</sup>静岡県 交通基盤部港湾局 漁港整備課(〒420-8601 静岡県静岡市葵区追手町9-6)

E-mail: takumi1\_yamada@pref.shizuoka.lg.jp

<sup>2</sup>静岡県 袋井土木事務所 工事課(〒437-0042 袋井市山名町2-1)

E-mail: tsuyoshi1\_fujiwara@pref.shizuoka.lg.jp

<sup>3</sup>一般財団法人 漁港漁村漁場総合研究所(〒101-0032 東京都千代田区岩本町3-4-6)

E-mail: tamura@jific.or.jp

<sup>4</sup>正会員 五洋建設株式会社 技術研究所(〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

E-mail: Hiroyuki.Katayama@mail.penta-ocean.co.jp

静岡県福田漁港では、2014年より国内初の固定式ジェットポンプによるサンドバイパスシステムを導入し、航路埋没対策だけでなく下手の浅羽海岸に対する恒久的な侵食対策の試験運転が実施されている。また試験運転期間中には運転および維持管理方法の最適化検討を行うためのモニタリングが行われている。

試験運転で得られた各種データの解析および海底地盤の測量調査などから、土砂輸送量と埋め戻り高さについて検討した結果、実海域においても効率的なバイパスシステムとなっていることを確認した。また週末休転時の埋め戻りから運転サイクルのうち週初の土砂輸送量が多く、週後半にかけて僅かながら減少する傾向が見られ、モニタリングを継続することで運転最適化が図れる可能性が示唆された。

**Key Words :** sand bypassing system, jet pump, test operation, fukude fishing port, sediment transport, bathymetry monitoring, dredging

## 1. はじめに

福田漁港は、二級河川太田川の河口に位置しており、沿岸漁業の拠点及び避難港として利用されている。しかし、天竜川から供給される東向き沿岸漂砂により、漁港西側の福田海岸に土砂が堆積し、航路埋没防止と漂砂下手側にあたる浅羽海岸の侵食が課題となっている。そのため静岡県は、ジェットポンプ式サンドバイパスシステム(Jet Pump type Sand Bypassing System: JP-SBS)工法を導入し、年間計画80,000m<sup>3</sup>以上の土砂輸送を目標に2014年から試験運転を実施している<sup>1)</sup>。

通常の侵食対策としては離岸堤や突堤などの海岸保全構造物を設置し、自然営力で移動する沿岸漂砂を捕捉することで機能を満足するものが多かった。このJP-SBSは、固定式ジェットポンプ(JP)を採用し、高圧水で周辺土砂を液状化し、水と砂を混合したスラリー水を吸引し、パイプライン方式で下手の海岸侵食域に土砂輸送することにより漂砂の連続性および土砂収支のバランスの回復を図る恒久的なシステムである<sup>23)</sup>(図-1)。同システムは、オーストラリアの2事例(Gold-Coast, Tweed-River)と南アフリカのNgqula港において稼働している<sup>45)6)</sup>。

国内で初めて導入されたJP-SBSにおいては、試験運転期間中に運転および維持管理方法の最適化を検討するため各種のモニタリングが行われている。今までに、松葉ら<sup>7)</sup>、波多野ら<sup>8)</sup>、岡辺ら<sup>9)</sup>、貝沼ら<sup>10)</sup>による福田・浅羽海岸に関わる海浜地形変化に関する調査研究により海浜回復メカニズムの報告がなされているが、今後、JP-SBSによる侵食対策を持続的に実施するにあたっては、稼働実績や浚渫特性、土砂吸引メカニズム等に着目した安定的な土砂輸送手法に寄与する知見の蓄積が重要となる。

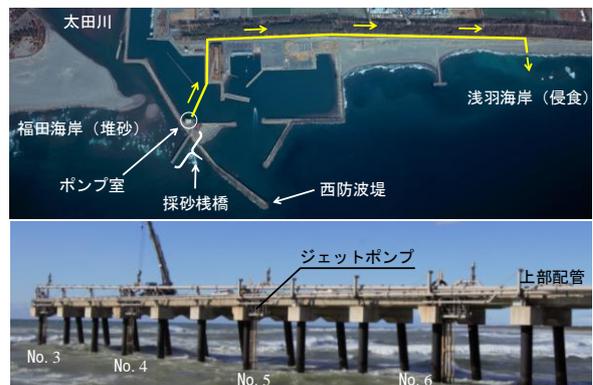


図-1 福田・浅羽海岸とJP-SBSの全体概要

そこで本研究は、JP-SBSの試験運転を対象に、システム監視操作プログラムに連続的に記録されている運転モニタリングデータの解析およびJP周辺海底地盤の深淺測量結果を整理し、試験運転状況および土砂吸引や埋め戻りに対する海底地形の応答について報告するものである。

## 2. サンドバイパスシステム試験運転の概要

### (1) 試験運転の概要

JP-SBSは、太田川河口に設置された延長180 mの採砂栈橋に30 m間隔で設置された合計4基のJP（採砂栈橋の先端からNo.3, 4, 5, 6）のうち、任意の1基を選択稼働しながら土砂を浚渫している。また、基本運転条件は8時から17時の8時間稼働、週5日運転としている。なお、試験運転開始当初はアカウミガメの上陸時期を考慮し5～8月の運転を休止していたが、2016年からは環境影響に配慮しつつ、同期間も夕刻1時間を短縮した稼働としている。各JPの設置条件および深淺測量結果（2018年1月）から得られた採砂栈橋周辺の縦断地形を図-2に示した。

また、表-1には2014年から2018年12月までの稼働状況を整理した。JP-SBSによる累積浚渫量(稼働日数)について2015年度、2016年度はそれぞれ88,736 m<sup>3</sup>（稼働日数149日）、81,493 m<sup>3</sup>（稼働日数222日）であり、年間計画土砂輸送量とされる80,000 m<sup>3</sup>以上の土砂輸送性能を確認した。また、2018年12月29日段階の総土砂輸送量は311,801 m<sup>3</sup>（稼働日数831日）となっている。

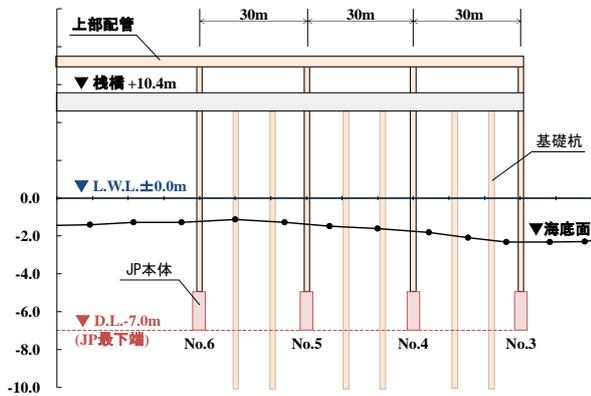


図-2 採砂栈橋周辺の縦断水深分布(2018年1月)

表-1 JP-SBSの試験運転実績

年度	稼働日数 (day)	稼働時間 (hour)	サンドバイパス量 (m <sup>3</sup> /year)
2014	79	478	51,188
2015	149	966	88,736
2016	222	1,524	81,493
2017	211	1,466	56,423
2018(～12/31)	173	1,165	33,961
合計	834	5,599	311,801

JP-SBS稼働中には、ポンプ室内にあるシステム制御用PCにより運転操作と同時に計測管理も行われており、継続的に各種の測定機器による計測が実行され、計測データは自動的にデータロガーに保存されている。このうち、吐出流量（電磁流量計、検出範囲0～600 m<sup>3</sup>/h）、含砂率（γ線密度計、検出範囲1.0～2.0 g/cm<sup>3</sup>）、海底面水深（重錘式オートレッド水深計、分解能1 cm）の設置箇所を図-3に示した。

### (2) ジェットポンプの閉塞回避対策

JPの維持管理作業の効率化から設置深度を浅くした2017年4月以降、JPの運転開始時に高圧駆動水がメインノズル部（噴出口内径52 mm）から噴出せず、液状化した土砂を吸引したスラリー水が排砂配管（内径230 mm）に吐出されない閉塞現象が顕著に発生することが確認された。2017年8月に、この閉塞現象が連続的に発生していたNo.3のJPを対象に、JP本体を栈橋上に引き上げ、分解点検による調査が実施された。その結果、JP配管のうちメインノズル部より上流側の高圧駆動水の曲管部（内径156 mm）にかけて、粒径0.5～30 mm程度の砂礫が溜まっていることが確認された（図-4）。

JPの運転切替は、採砂栈橋上部に設置された駆動水を制御する駆動水バルブの開閉により操作され、通常はJP運転時の配管内は駆動水圧1.0 MPa、流量300～450 m<sup>3</sup>/h程度となる。この駆動水バルブの閉鎖によって、配管内では水柱分離による負圧が発生する。

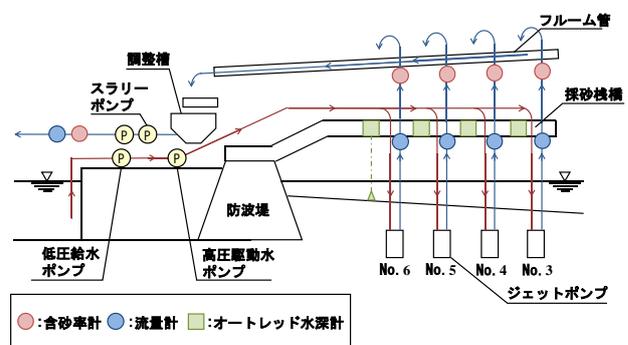


図-3 各計測センサの設置位置



図-4 JP配管に流入した砂礫

この対策を検討した結果、駆動水バルブ前後にバイパス用管路を追加し微量海水が常時流れることで、運転切替時にノズル部で僅かながら上昇流が発生し、負圧を緩和させることで配管閉塞を軽減する「バイパス管工法」の試験的な実装を試みた。

最も閉塞回数の多かったNo.3JPを対象に、2018年7月に流量調整バルブ付きのバイパス管（内径50A、L=1.8 m）を設置し、運転切替時の負圧緩和対策としての現地適応性について実機試験を実施した（図-5）。

バイパス管の設置により、駆動水バルブを閉じても流量調整バルブの開閉度に合わせて40～130 m<sup>3</sup>/hの流量がJP本体に流れることが確認された。また、設置前後における各JPの閉塞による不稼働日数についてモニタリングを実施した結果、バイパス管設置以前の2017年～2018年7月12日までは運転日数554日の間に閉塞日数が105日（19.0%）であったが、施工後から12月29日間の運転日数110日間においては閉塞日数8日（7.3%）と閉塞現象に対する効果が確認された。この結果を反映し、残り3基のJPへのバイパス管設置が計画されている。

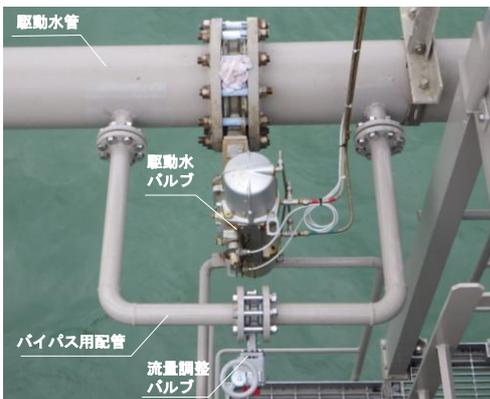
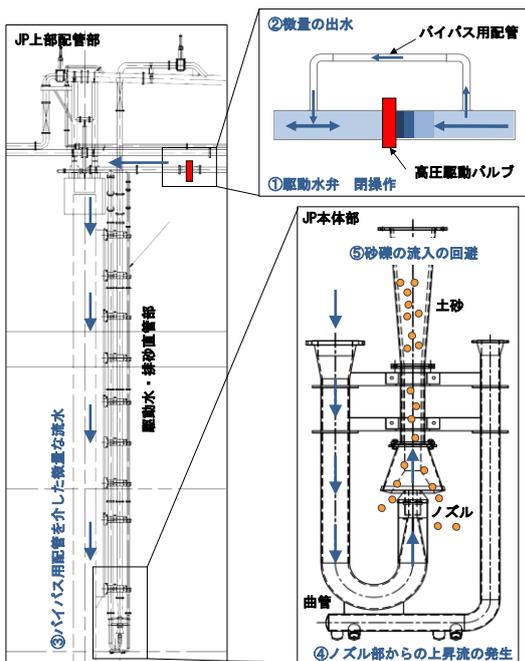


図-5 バイパス管工法の概要と設置状況

## 2. 土砂吸引による海底地盤の変動状況

### (1) オートレッドを用いた海底地盤モニタリング

JP-SBSの土砂吸引による連続的な海底地盤の変化を把握するために、各JPに設置された海底面計測用オートレッド水深計による水深データを整理し、海底地形の変化量を取得した。各計測データは、図-6に示した日運転のプロットデータ例のように、含砂率と吐出流量は1秒、水深データは10分間隔でサンプリング・保存されている。

次に、2014～2018年の試験運転期間のうち、オートレッド計測が連続的に記録されていた2018年1月1日から12月31日までの海底地盤データを整理し、JP稼働による海底地盤高の年変化を調べた（図-7）。なお、オートレッド計測位置はJP設置位置から2m離れている（図-8）。

この結果をみると、運転前後の地盤高変化が大きく見られる期間では土砂吸引量も多くなっており、1日の運転における浚渫深さが最大で2 m程度あることがわかる。サンドトラップの深さは最大でDL-5.0 m近くに達していることもある。JP本体最下部はDL-7.0 mであり、サンドトラップは土砂吸引と同時に砂斜面の崩壊が生じる等のため、ノズル部までのサンドトラップは形成されないものと推定される。また輸送土砂の起源が、JP運転中に各位置のサンドトラップに流入する沿岸漂砂の直接的な吸引によるものであれば地盤高変化は顕著に見られないことから、主に運転開始前までにサンドトラップ内に堆積した砂を吸引しているものと考えられる。また、9月の台風時期に全てのJPにおいてDL-0.0 m付近まで埋め戻された現象の他は、オートレッド測定位置のみの結果のため平面的な地形変化までは確認できないが、年間を通して最大でもDL-1.0～2.0 m程度までしか埋め戻されていないことがわかった。なお、JP6において4～5月に地盤高変化が約DL-2 m付近で停滞しているが、これはノズル部の閉塞現象に伴う土砂輸送量の低下が起因していると思われる。

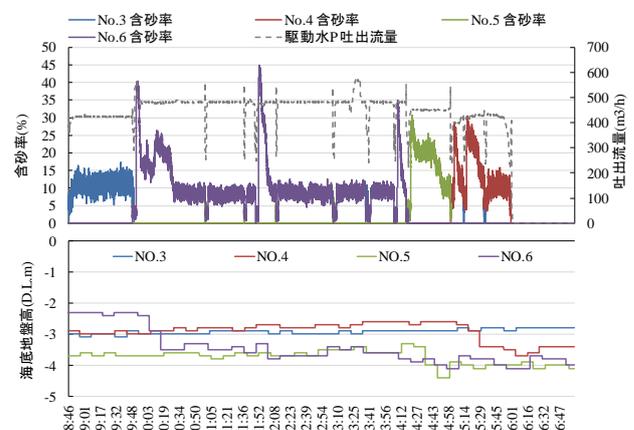


図-6 各JPの運転状況及び海底地盤の日変化  
(2018年11月15日のケース)

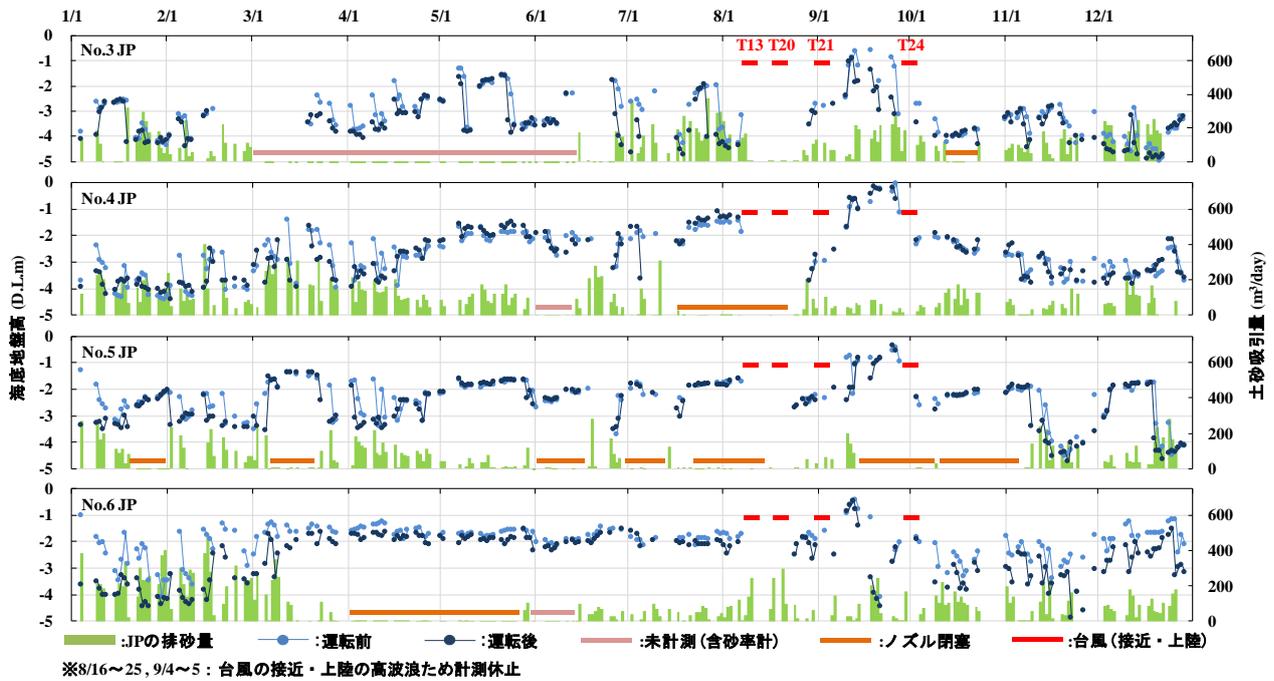


図-7 JP稼働に伴う地盤高の年変化(2018年1月~12月)

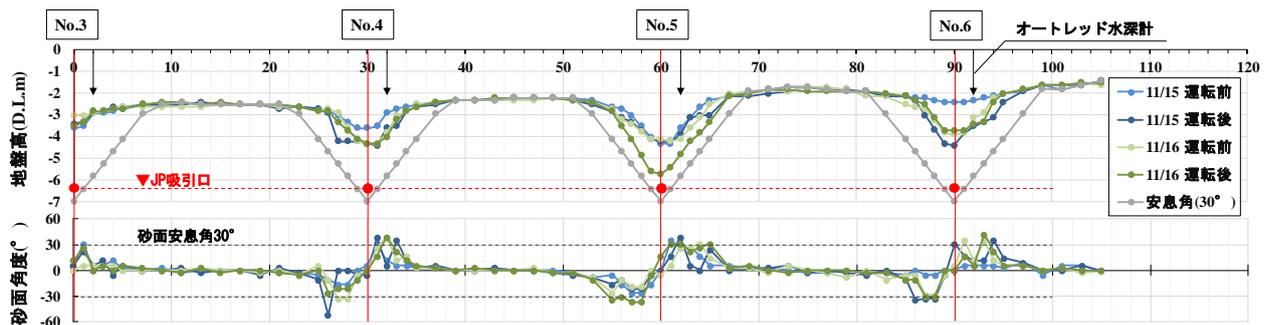


図-8 サンドトラップの形成過程と砂面勾配(2018/11/15~11/16)

## (2) サンドトラップ形成過程の測量調査

実海域でJP稼働により形成される海底面形状を把握するために、2018年11月15~16日にレッド測量調査を追加実施した。測点は、採砂栈橋橋軸両方向にJP設置位置を中心に0m~5mまでを1m間隔、5m~15mまでを2m間隔とした。JP運転前後の海底地盤高さ、各測点間の砂面局所勾配を図-8に示す。また、同期間の波浪状況として竜洋観測所の波浪記録を図-9に示した。

レッド測量調査の結果より、各JPによる土砂吸引で形成されたサンドトラップ深さは異なるが、図-7でも確認されたように、いずれもJP吸引口の地盤高までのサンドトラップは形成されないことが確認された。

期間中は竜洋地点で1.0m程度の有義波高であったため採砂栈橋地点でも同程度の波浪と考えられるが、この程度の波浪条件ではサンドトラップの埋め戻しがほとんどなく、各安息角に応じたすり鉢形状が短期間においては維持されていることが確認された。

また形成された砂面勾配は30~40度程度であった。福田地点の底質粒径(0.2~0.3 mm程度<sup>11</sup>)に対応した静的な安息勾配は23~30度程度<sup>12</sup>)と考えられ、動的な吸引により形成された砂面のため若干高めではあるがほぼ静的

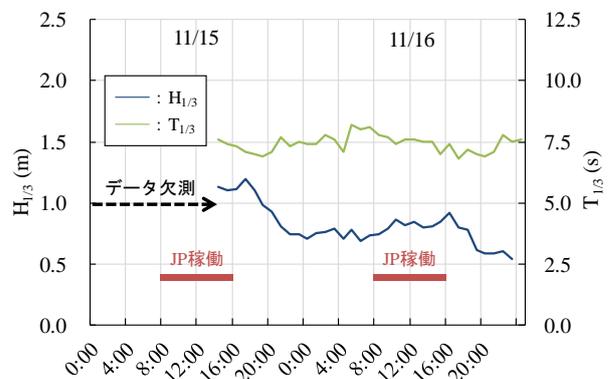


図-9 調査日(11/15,16)の波浪条件

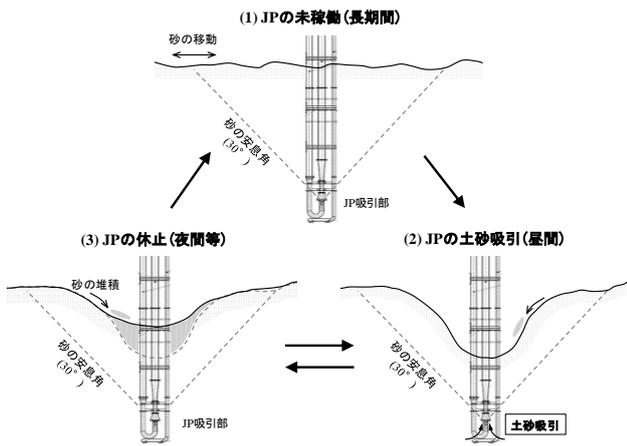


図-10 サンドトラップの土砂吸引・堆積過程の模式図

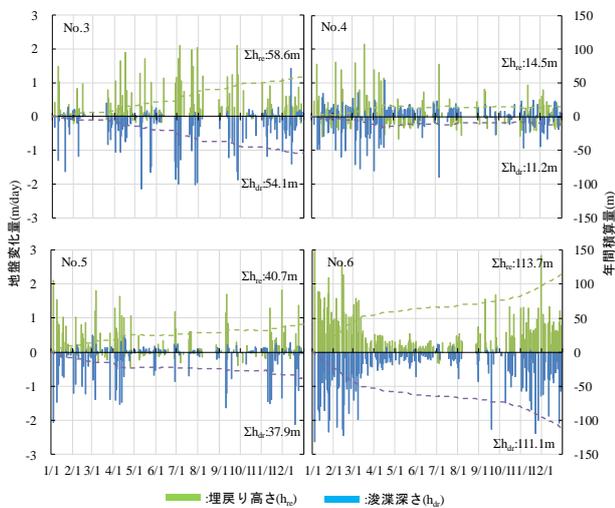


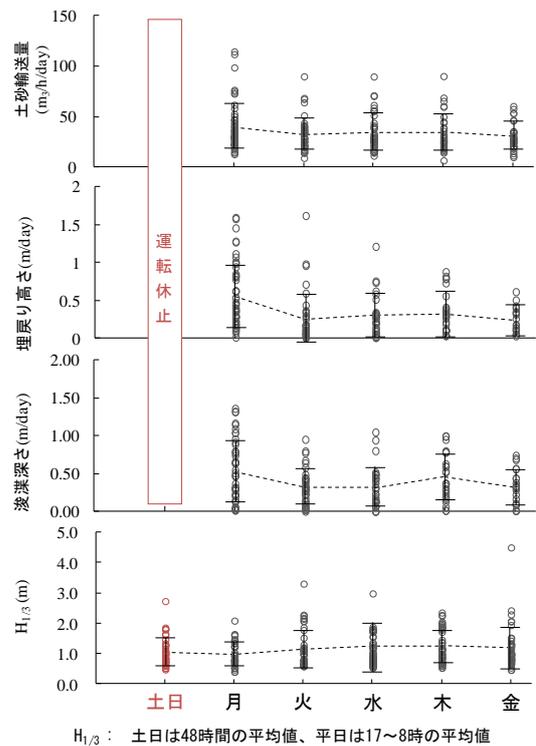
図-11 海底地盤の変化量 (No.3,4,5,6 JP)

な安息角に近いことが確認された。図-10にはサンドトラップの土砂吸引および堆積過程の模式図を示した。

### (3) 土砂の吸引と流入の関係

計測された地盤高を用いて浚渫深さ $h_s$ と埋め戻り高さ $h_b$ の関係を整理した(図-11)。図には毎日のオートレドによる浚渫深さ(=運転開始前と終了後の差分)と埋め戻り高さ(=運転終了後と翌日朝の運転開始前の差分)の他に、両値の累積値(年間積算量)も示した。

これをみると、浚渫深さと埋め戻り高さは外的要因(海象等)に相関はないが、浚渫深さが大きい期間で埋め戻り高さも大きくなっている。これは、土砂吸引量に応じて形成されるサンドトラップに十分な深さがなく、大きい埋め戻り高さが観測されないためとも考えられる。即ち、埋め戻すための沿岸漂砂が十分あっても、捕捉するサンドトラップが形成されていないと通過してしまい埋め戻り高さとして計測されないということである。このことは、浚渫深さと埋め戻り高さの年間積分量がほぼ同程度となっていることから推察できる。これらのこ



$H_{1/3}$ : 土日は48時間の平均値、平日は17~8時の平均値

図-12 各データの週運転の傾向

とから、JP-SBSは平均的にはJP位置のサンドポケットへ流入した沿岸漂砂を効率的に吸引し、下手の浅羽海岸に輸送するシステムとなっていると評価できる。

### (4) 運転特性と地形変化量の比較

JP-SBSの運転特性を更に詳細に確認するため、週5日運転のうち、連続運転を実施した期間における毎日の土砂輸送量と埋め戻り高さおよび波浪との関係を整理した(図-12)。図には、サンドバイパス量、浚渫深さ、埋め戻り高さ、および夜間の平均波高を曜日別にプロットしたもので、横棒は分散を、点線は平均を示している。

整理結果をみると、週初めの埋め戻り高さは週末の運転停止後の作用波浪継続時間が他の曜日に比べ長くなることから大きくなる傾向が見られる。また、埋め戻り高さほど顕著ではないが、これに追随しサンドバイパス量と浚渫深さも僅かながら週初めの方が大きくなる傾向が見られる。一方で、これらの諸量と平均波浪との明確な相関は見られない。即ち、サンドポケットへの土砂流入量は概ね作用波浪継続時間が長くなる週末に多く、日々の流入量は土砂輸送量に比べ平均的には過小なため、週後半に向かい減少しているものと考えられる。

埋め戻り高さについては、連続する運転休止日数との関係も調べた(図-13)。埋め戻り高さにはばらつきは見られるものの、平均的には運転休止が長いほど大きくなる。また、運転休止前の浚渫深さの閾値を0.3 mとした場合、運転休止が2日、3日と長くなると直前の浚渫深さが大きいほど埋め戻り高さも大きくなる傾向が見られた。

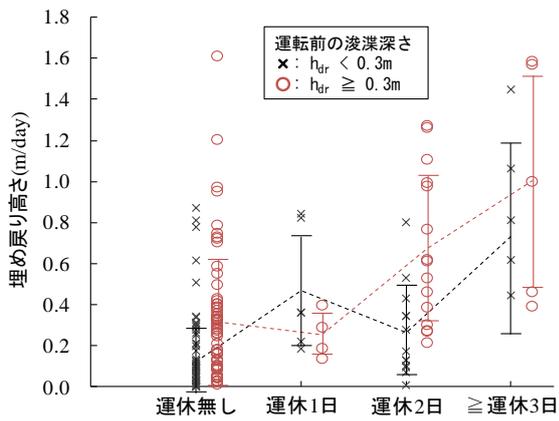


図-13 運休休止日数と埋め戻りの関係

なお、更にモニタリングを継続して判断する必要があるものの、モニタリングデータの整理結果からは、例えば、週初めの運転時間を増やし、週末の運転時間を減じるなどの最適化の可能性が示唆されたものと考えられる。

#### 4. 終わりに

国内初の固定式ジェットポンプによるサンドバイパスシステム試験運転のモニタリングデータを整理した結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) JP稼働に対する海底地盤の応答を確認し、土砂吸引により生じた砂面安息角に応じたサンドトラップが形成されていることを確認した。
- (2) JP設置位置の日々の運転による浚渫高さや夜間の埋め戻りの関係から、平均的にはサンドトラップへの流入土砂を効率的に輸送していることが確認できたが、週初めの埋め戻り量が多い傾向があること等の運転サイクルである週間特性もみられ、更にモニタリングを継続することで運転の最適化が図れる可能性が示唆された。

#### 参考文献

- 1) 渡辺壮彦・盛英・岡田英明：福田漁港・浅羽海岸サンドバイパスシステム，建設機械施工，Vol.66，No.8，pp.53-57，2014
- 2) 伊藤鎌太郎：国内初のサンドバイパスシステム(福田漁港・浅羽海岸)の取組状況，河川，Vol.72，No.8，pp.23-27，2016。
- 3) 伊藤鎌太郎：高塚博・戸田晃裕：福田漁港・浅羽海岸サンドバイパスシステムの取組み，海洋開発シンポジウム講演集，S1-2，6p.，2016。
- 4) Gold Coast Waterways Authority：Gold Coast Seaway & Sand Bypass System，<https://gcwa.qld.gov.au/sandbypass-system/>，(access:2019.3.11)。
- 5) Tweed Sand Bypassing：Tweed Sand Bypassing Overview，<https://www.tweedsandbypass.nsw.gov.au/why-tweed-sand-bypassing>，(access:2019.3.11)。
- 6) Kyle, R.：Shoreline Changed and Longshore Transport at the Port of Ngqura, Thesis for degree of Master, Stellenbosch Univ.，243p.，2015。
- 7) 岡辺拓己・加藤茂：漁船ビッグデータを用いた静岡県福田漁港・浅羽海岸の海底地形モニタリング，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol.73，No.2，pp.I\_607-I\_612，2017。
- 8) 波多野景治・佐藤慎司・櫻澤崇史：福田浅羽海岸サンドバイパス事業による海浜回復の実態，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol.73，No.2，pp. I\_805-I\_810，2017。
- 9) 松葉義直・佐藤慎司・波多野景治：静岡県福田浅羽海岸サンドバイパス吐出口周辺における UAV を用いた地形変化監視手法の適用，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol.72，No.2，pp. I\_853-I\_858，2016。
- 10) 貝沼征嗣・袴田充哉・戸田晃裕・宇多高明・石川仁憲：福田漁港周辺での東向き沿岸漂砂の阻止による地形変化の解析，土木学会論文集 B3(海洋開発)，Vol.74，No.2，pp. I\_665-I\_670，2018，
- 11) 竹原洋一郎・森田整・小島大典・富澤伸樹：遠州灘の堆砂侵食問題に挑むジェットポンプ式サンドバイパス技術の効果について，一財漁港漁場漁村総合研究所調査研究論文集，No.26，pp.29-36，2015。
- 12) 河村三郎：土砂水理学，p.10，1982。

(2019.3.13 受付)

## MONITORING OF SAND TRANSPORTATION AND BATHMETRY CAHNGE IN TEST OPERATION BY JET-PUMP TYPE SAND BYPASSING SYSTEM

Takumi YAMADA, Tsuyoshi FUJIWARA, Yuichiro TAMURA and Hiroyuki KATAYAMA

At the Fukude fishing port, the sand bypassing system by the fixed jet pump was introduced in 2014. Not only the countermeasures against shoaling of fairway but the test operation of the permanent method against erosion for Asaba coast is carried out. The monitoring for optimization of operation and the maintenance method is implemented during the test operation.

From the analysis of the various data by test operation and the survey of the submarine topography, etc., the amount of bypasses and the backfill height was examined. Consequently, it became clear that it is an efficient bypass system. Moreover, the tendency which there are in the first half of a week as for the amount of bypasses, and decreases in the second half of a week was checked. A possibility that operation optimization could be attained by continuing monitoring was suggested.