土木学会論文集B2(海岸工学), Vol. 76, No. 2, I_1327-I_1332, 2020.

バングラデシュ南東部に建設中の深海港における航路埋没モニタリング

佐貫　宏[1]・黒滝　秀平[2]・Kevin BOBILES[3]・鵜飼　亮行[4]・水流　正人[5]
・荒明　裕貴[6]・中山　晋一[7]・阿部　義史[8]・高江　圭作[9]

[1]正会員　五洋建設（株）技術研究所海岸海洋チーム（〒329-2746栃木県那須塩原市四区町1534-1）
E-mail:hiroshi.sanuki@mail.penta-ocean.co.jp
[2]正会員　五洋建設（株）技術研究所海岸海洋チーム（〒329-2746栃木県那須塩原市四区町1534-1）
E-mail:shuuhei.kurotaki@mail.penta-ocean.co.jp
[3]正会員　五洋建設（株）技術研究所海岸海洋チーム（〒329-2746栃木県那須塩原市四区町1534-1）
E-mail:kevin.bobiles@mail.penta-ocean.co.jp
[4]正会員　五洋建設（株）技術研究所（〒329-2746栃木県那須塩原市四区町1534-1）
E-mail: akiyuki.ukai@mail.penta-ocean.co.jp
[5]正会員　五洋建設（株）技術研究所（〒329-2746栃木県那須塩原市四区町1534-1）
E-mail:masahito.tsuru@mail.penta-ocean.co.jp
[6]Matarbari project office, Penta-Ocean Construction Co. Ltd. (Chittagong region, BANGLADESH)
E-mail:yuuki.araake@ mail.penta-ocean.co.jp
[7]Matarbari project office, Penta-Ocean Construction Co. Ltd. (Chittagong region, BANGLADESH)
E-mail: shinichi.nakayama@ mail.penta-ocean.co.jp
[8]Matarbari project office, Penta-Ocean Construction Co. Ltd. (Chittagong region, BANGLADESH)
E-mail: yoshifumi.abe@ mail.penta-ocean.co.jp
[9]Matarbari project office, Penta-Ocean Construction Co. Ltd. (Chittagong region, BANGLADESH)
E-mail: keisaku.takae@ mail.penta-ocean.co.jp

本稿は，現在建設中のマタバリ石炭火力発電所港湾について，現地データを基に現場海域の特徴や航路埋没特性を報告するものである．毎月実施している深浅測量結果から，航路埋没は5～9月のモンスーン期に顕著であることが改めて確認された．一方，航路埋没量について実測値と事前予測解析結果と比較すると，両者は概ね良好に対応した．波浪・濁度観測も併せて実施した結果，航路埋没は港外の高濁度に強く起因し，特に高波浪と大潮が重なると，著しい埋戻りを生じることが明らかとなった．また，港内の堆積土砂はシルト～粘土分が支配的であり，将来の航路管理を考える上で有用な浮泥厚データについても計測を行った．さらに，現場海域では外郭施設周辺の洗堀も重要なモニタリング項目の一つであり，北防砂堤先端部において顕著な洗堀が確認された．

Key Words : *sedimentation, monitoring, channel dredging, numerical simulation, Bangladesh*

1.　研究の目的

現在，バングラデシュ南東部において，マタバリ超々臨海圧石炭火力発電所プロジェクトが進行中である．本発電所建設事業は（独）国際協力機構（JICA）による円借款事業（ODA）として，成長著しいバングラデシュ国内での安定した電力供給を可能にし，同国の持続的な経済成長に寄与することが期待されている．

本事業では，輸入石炭を活用した発電所施設（600MW×2基）のほか，石炭船受入れのための港湾施設として，長さ14km，幅250m，深さ18.5mの航路泊地と，航路埋没対策を目的とした南北防砂堤が建設される計画である（**図-1**）．港湾施設については鹿島港をモデルとした掘込み式港湾が採用され，貨物需要が旺盛な同国において，将来，大型コンテナ船も受入れ可能な同国初の深海港としても期待が高まっている．なお，工事については，準備工事として，2017年2月に建設資材搬入のための仮航路（水深-7m，**図-1**赤枠）が完成し，その後本工事として，2018年1月より本航路（水深-18.5m，**図-1**水色枠）の浚渫工事がスタートした．また，2018年10月より北防砂堤工事が本格着工し，さらに，2019年10月より南防砂堤工事が開始となった．**図-2**は2020年1月の施工状況である．防砂堤機能を早期に発揮させるため，水中可視化等の高度技術を活用しながら急速施工を行い[1]，

両防砂堤は2020年5月無事完成を迎えたところである．

一方，現場海域は，ベンガル湾特有のモンスーン気候に加え，ガンジス川を始めとして陸域からの大量の土砂流入と，波浪および潮汐流が複雑に作用するため，漂砂環境が非常に厳しいエリアであることが知られている．このことから，計画当初より浚渫した航路の埋没が強く懸念され，事実，2017年2月に完成した仮航路（水深7m）は，5〜9月の雨季（モンスーン季）を挟んで2017年10月までの間に著しい埋戻りが生じ，航路水深は約3mにまで減少している[2]．ただし，このような環境にもかかわらず、当該地点が事業適地として選定された理由として、同国沿岸部において水深20m以上の深海部へのアクセスが比較的容易な点が挙げられる．

こうした背景から，本工事に際しては，施工中の航路埋没量の適切な予測とモニタリングによる監視が重要な課題であった．本稿はそれらについて報告するとともに，得られた現地データに基づいて，現場海域の特徴や航路埋没特性について明らかにするものである．

2.　工事期間中の航路埋没予測

本工事では航路完成まで3年程かかるため，航路埋没量が浚渫計画に大きく影響する．そこで，本工事に先立ち，数値シミュレーションに基づいて，3年間の浚渫期間中の航路埋没量を事前評価した．

(1)　現場周辺の海象概況

現場周辺は，雨季（モンスーン季）と乾季（非モンスーン季）の2つの明確な季節に分けられる．5〜9月のモンスーン季は波が高く，季節の変わり目である5月および9月頃には数年に一度サイクロンが来襲する．近傍点（E91.5deg-N21.5deg）のGPV波浪データによれば，7月の平均有義波高はH=2.2mで最も高く，2月がH=0.6mで最も低い．また，来襲波向は，1年を通じてほぼSSWが支配的となっている[2]．

一方，沿岸を流れる潮汐流は最大で4〜5ktと非常に強く，上げ潮時は北流，下げ潮時は南流が卓越する．潮位差についても約4.3mと非常に大きく，港湾施設の設計潮位はH.W.L.= M.S.L.+2.2m，L.W.L.= M.S.L.-2.2mとなっている[3]．また，平均潮位についても約0.9mの年変動があり，2月頃が-0.4mと最も低く，8月頃が+0.5mと最も高くなっている[4]．

(2)　航路埋没シミュレーションモデル

航路埋没予測にあたっては，現地海象状況を踏まえて波浪や潮流の影響を考慮し，シミュレーションモデルを構築した．詳細はSanuki et al.[2]に詳しいが，ここでは要点を絞ってモデル概要を説明する．

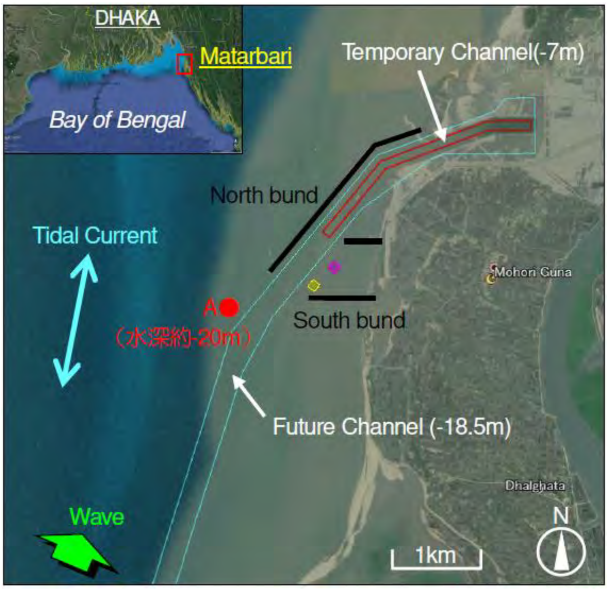

図-1　発電所港湾計画図

図-2　港湾工事の状況（2020年1月）

a)　波浪場

波浪場の評価はIsobe[5]の砕波減衰項を付加したエネルギー平衡方程式を用いた．入射波条件は気象庁GPVデータを基に設定し，時々刻々の波浪変動を簡略的に考慮するため，一つの代表波浪（Ho=1m, To=7s, θ =SSW）に対する波高分布パターンを作成し，時々刻々の波高値を乗じることで波浪場を算定した．

b)　流況場

流況場については，水平拡散項，Manning底面摩擦項，radiation stress項を考慮した2次元浅水流方程式を用いて評価した．時々刻々の潮汐流を求めるため，計算領域の北端および南端における潮位時系列をグローバル潮汐モデルNao99b[6]を使って推定し，これを開境界における潮位条件として設定した．

c)　底質の挙動

巻上項および沈降項を付加した2次元移流拡散方程式に基づいて底質の挙動を表現した．底質は砂およびシルトの2成分から成る混合底質として取扱い，各成分の巻上項および沈降項は次式で定式化した．

$$E_1 = (1-R_{silt})M(\tau_b/\tau_e - 1) \quad \text{for sand}$$
$$E_2 = R_{silt}M(\tau_b/\tau_e - 1) \quad \text{for silt} \tag{1}$$

$$D_1 = w_1 C_{b1}(1-\tau_b/\tau_{d1}) \quad \text{for sand}$$
$$D_2 = w_2 C_{b2}(1-\tau_b/\tau_{d2}) \quad \text{for silt} \tag{2}$$

巻上項はPartheniades[7]を参考に，波・流れの影響を考慮した底面せん断力τ_bに比例する形とし，底質中のシルト含有率R_{silt}を考慮することで，各成分の巻上量を定式化した．ここで，シルト含有率R_{silt}は各成分の沈降フラックスより時々刻々計算される変数としている．

また，砂質土中に少量のシルト（5-20%程度）が混ざっていると，純粋な砂質土と比べてより高密度となり，砂粒同士の接着効果も生まれることで，巻上抵抗力が増加する傾向がある[8]．モデルではこれを考慮するため，巻上限界τ_eおよび空隙率nをシルト含有率R_{silt}の関数として関連付けている[2]．

砂の沈降速度については様々な実験データと比較検証されているSoulsby[9]を用いた．シルトの沈降速度は濃度依存性を考慮し，底面濃度に比例する形[8]で評価した（上限値4mm/s，下限値0.1mm/s）．

d) 地形変化量式

時々刻々の地形変化量は，底面における各成分の巻上量および沈降量の収支として，次式により計算した．なお，式中でnは底質の空隙率である．

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \vec{q}_{SB} + \frac{1}{1-n}(D_1 - E_1) + \frac{1}{1-n}(D_2 - E_2) \tag{3}$$

(3) モデルパラメータおよびモデル検証

モデルパラメータを**表-1**に示す．また，モデル検証は，2017年4～10月の仮航路における埋戻り状況を再現することにより実施した．再現期間の侵食堆積図，縦断地形および埋没土量を実測値と比較し，概ね良好な再現性を確認した[2]．

(4) 工事期間中の航路埋没量

航路埋没量の予測期間は，本工事以降の最初の雨季が始まる2018年5月から2021年4月に至る3年間とした．

表-1 モデルパラメータ

項　目	設定値
水平格子サイズ(m)	$\Delta x = \Delta y = 20$
時間ステップ(s)	$\Delta t = 0.8$
海水密度(kg/m^3)	$\rho_w = 1030$
土粒子密度(kg/m^3)	$\rho_s = 2650$
砂の粒径(mm)	$D_1 = 0.150$
シルトの粒径(mm)	$D_2 = 0.011$
砂の沈降速度(mm/s)	$w_1 = 15.8$
シルト沈降速度(mm/s)	$w_2 = 0.001C_b\,(0.1 < w_2 < 4.0)$
巻上係数(kg/m^2/min)	$M = 0.020$
巻上限界せん断力(Pa)	$\tau_{e1} = 0.16,\ \tau_{e2} = 0.30,\ \tau_{emax} = 0.60$
沈降限界せん断力(Pa)	$\tau_{d1} = 0.60,\ \tau_{d2} = 0.30$
空隙率	$n_1 = 0.40,\ n_2 = 0.70,\ n_{min} = 0.30$

雨季と乾季では堆積傾向が異なるため，ここでは3年間を計6シーズンに分割し，各シーズンの埋没量を個々に計算して，それらを合計することで3年間の総埋没量とした．また，航路浚渫および防砂堤工事の計画工程を予測計算に考慮し，それらを各シーズンの計算地形にそれぞれ反映させた．計算地形の作成にあたっては，航路泊地についてはシーズン終了時，防砂堤についてはシーズン開始時の状態を計算地形に考慮した．雨季と乾季の波浪および潮位については，それぞれGPVデータおよびNao99b[6]を使って設定した．

航路埋没量の予測結果を**図-3**に示す．図中の青数字は各シーズンの埋没量を示しており，3年間の合計で10.93×10^{6}m^{3}と推定された．

3. 現地モニタリングと航路埋没特性

(1) 定期深浅測量

本工事では，施工中の航路埋没量をモニターするため，毎月下旬～月末にかけてナローマルチビーム測量を実施している．**図-4**は，顕著な埋戻りがみられた2019年8月の実測例である．港奥まで堆積傾向がみられ，ポケット状の浚渫痕に最大で2m程度の堆積がみてとれる．

また，船の定期点検のため浚渫作業が休止していた2019年3月～10月の航路縦断地形を**図-5**に示すが，この

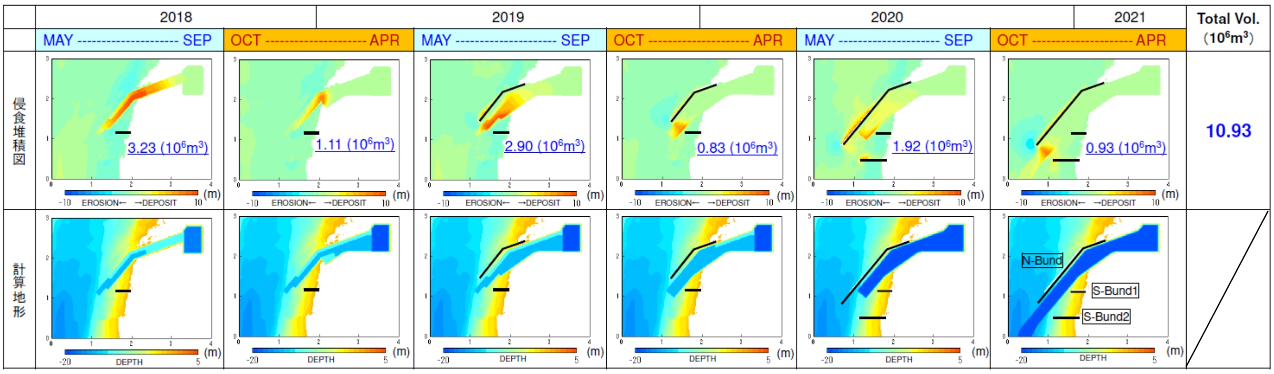

図-3 工事期間中の航路埋没量予測（2018年5月～2021年4月）

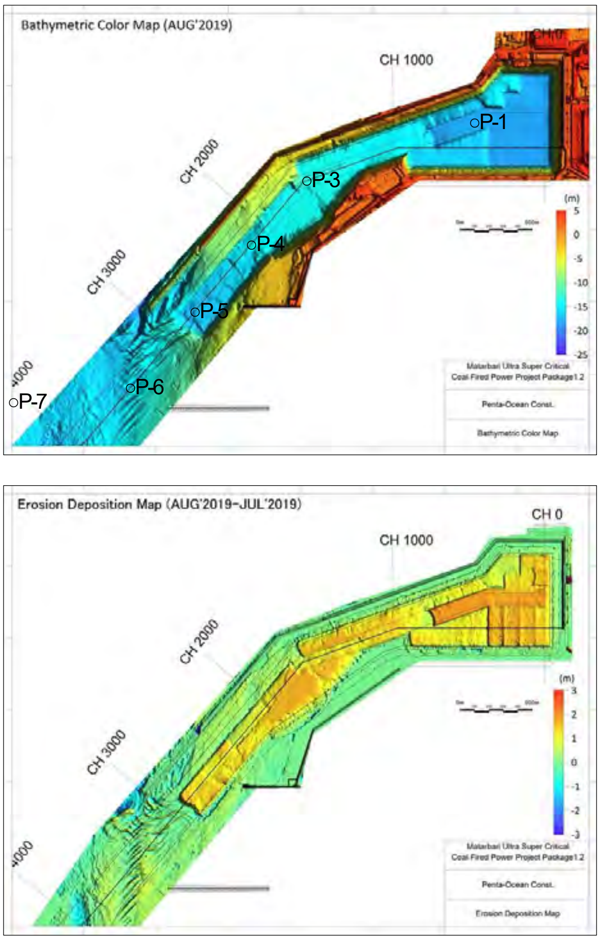

図-4　マルチビーム測量（2019年8月の例）

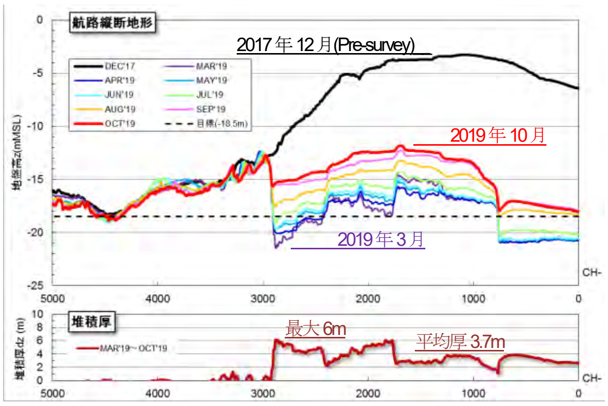

図-5　航路縦断地形と堆積厚

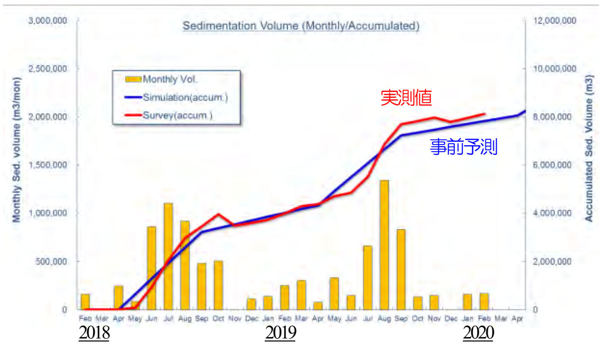

図-6　月別の航路埋没量

期間の堆積厚は最大箇所で約6m，平均厚で3.7m (=0.53m/mon)であった．

さらに，月別の航路埋没量を**図-6**に整理した．埋没量は前月との差分に基づいて算出するが，浚渫作業が行われた月はそれも加味して埋没量を算定した．やはり，5～9月の雨季に顕著な堆積傾向を示し，2019年8月の埋没量は約130万m^{3}を記録した．参考までに，2018年10月～2019年9月で年間の航路埋没量を求めると，約424万m^{3}である（雨季：約332万m^3，乾季：約92万m^3）．なお，累計埋没量を事前予測と比較すると，実測値のほうが若干大きいものの，ほぼ当初想定通りに推移している（2020年4月時点で実績値827万m^3，予測値807万m^3）．

(2)　ドローン撮影による濁りの分布観察

ドローンを利用して，港内への濁りの進入状況を調査した（**図-7**）．撮影は2019年8月29日の上げ潮時に行い，1h毎に濁りの状況を写真に記録した．港外の濁りは7時頃，上げ潮の流れに乗って港内へ進入し，9時頃には港奥に到達した．その後，数時間で海面の濁りが引いていることから，一度の潮の干満で進入した濁りは，港内である程度沈降することが確認された．

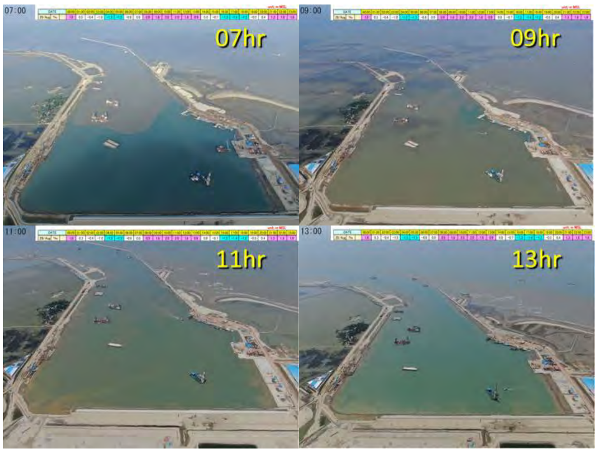

図-7　港内への濁りの進入・沈降状況（29/AUG/2019）

(3)　波浪・流況・濁度の定点観測

定期深浅測量に加えて，2019年5月より，港外の水深約20m地点（**図-1**A点）において，波浪・流況・濁度の定点観測を実施した．波浪観測は超音波波高計（Wave Hunter14Σ，アイオーテクニック社製）を使用し，20min/60min/0.5sの観測モードでデータ収録した．また，濁度観測は高濃度対応のメモリー式濁度計（Infinity-Turbi, JFEアドバンテック社製）を使用し，観測モードは10s/10min/1.0sとした．なお，計測器はコンクリート製シンカーブロック上面に金具固定し，海底に設置した（センサー高は底面上約1.5m）．

図-8に観測データの時系列波形を示す．7～9月にかけて波高1-2m程度の高波浪が断続的に来襲している．また，

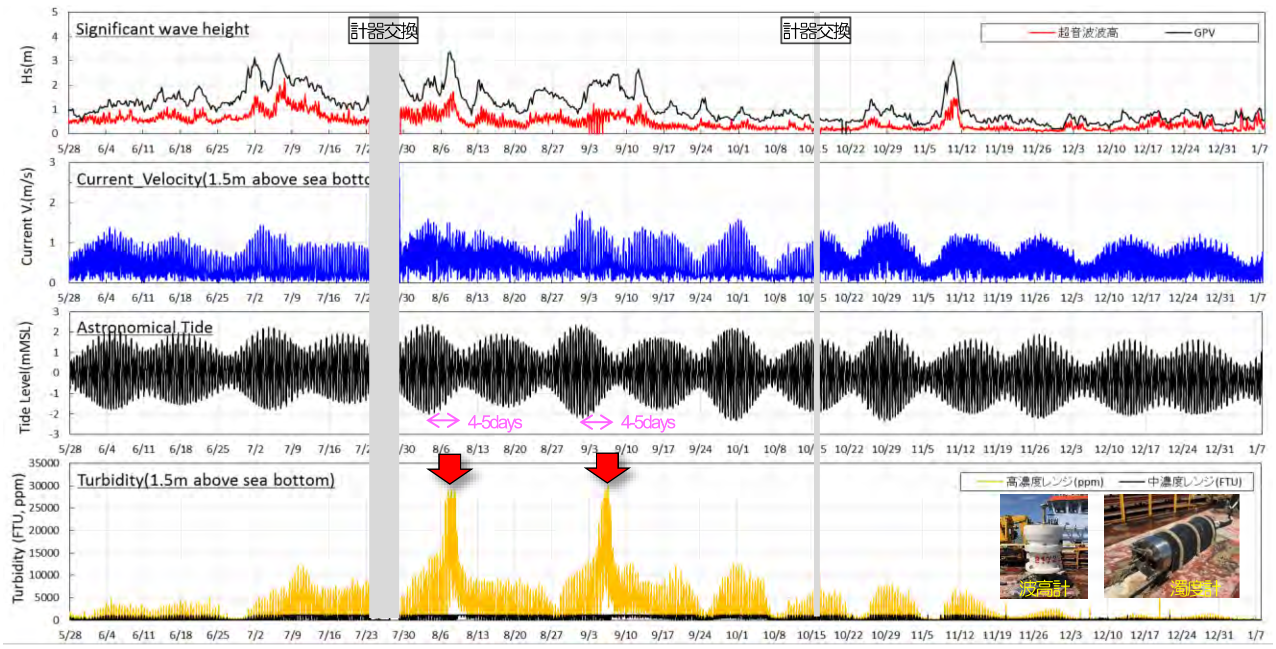

図-8　波浪・流況・潮位・濁度の時系列変化（2019/5/28～）

参考に示したGPVデータが観測波高と比べて大きいのは，GPV抽出点が施工箇所より約40kmと離れているためである．さらに，底面流速は潮位変動に対応し，表層より小さいものの，大潮時で最大約1.5m/s程度であった．

一方，濁度については，基本，潮位変動に対応して濃度上昇するものの，特に，8月上旬／9月上旬において，2回ほど30,000ppm程の高濁度を観測した（**図-8**赤矢印）．この高濁度は高波浪の影響も考えられるが，どちらも振幅の大きい大潮の4～5日後に発生している．このことから，高波浪かつ強潮流により巻き上げられた底質が数日かけて沈降する過程で，底面濃度が上昇したものと推察される．また，この高濁度に起因して，8月および9月は80万m^{3}を超える埋没量となった．

(4)　底質サンプリング

図-4中のP-1～P-7地点において，底質サンプリングを実施した（**図-9**）．P-5より港内側はほぼシルト～粘土質である一方，港外側のP-7では季節によって底質の違いがみられ，12月は8月よりもシルト分を多く含んでいた．また，砂分の粒径は0.1～0.3mm程度であった．

(5)　浮泥厚調査

2周波シングルビーム測深器を用いて航路中心線上の縦断地形を測定し，浮泥厚を調査した（**図-10**）．場所によって変動はあるものの，4月は平均約20cm程度，5月は平均約40cm程度と，5月に入り浮泥厚は増大傾向であった．ただし，季節の変わり目におけるデータであることと，本データは将来の効率的な航路管理を考える上で有用なデータとなるため，今後も継続調査が必要と考える．

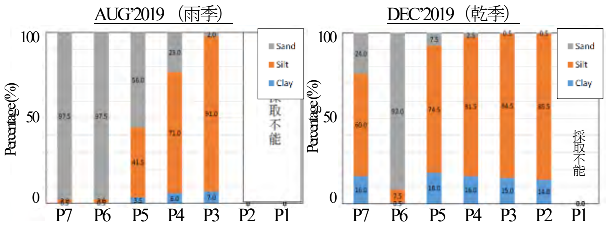

図-9　雨季と乾季における底質の違い

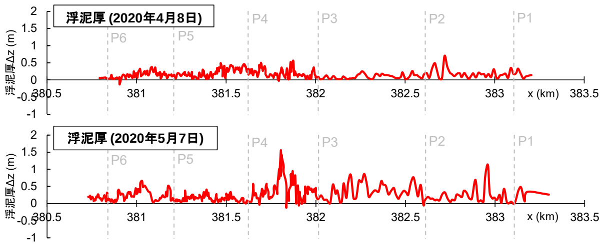

図-10　浮泥厚測定結果

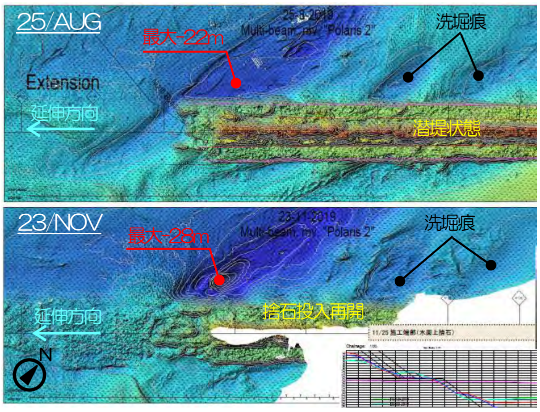

図-11　施工中の北防砂堤先端付近の洗堀状況

(6)　堤頭部における洗堀状況

防砂堤先端付近は潮流の影響を強く受けるため，常に洗堀状況を監視しながら計測施工を進めた．**図-11**は，

施工途中の北防砂堤先端付近の洗堀例である．洗堀は防砂堤先端付近の港外側で生じており，洗堀箇所が防砂堤延伸に伴って徐々に延伸方向へ移動しつつ，古い洗堀痕は逆に堆積傾向を示すのがわかる．また，11月に捨石投入を再開すると，先端部港外側で急激に洗堀が進行し，洗堀箇所の最大水深は約22m→28mとなった．防砂堤の先端形状がその周辺の流動場に大きく影響していることを示唆している．なお，南防砂堤については，潮流に対し北防砂堤の遮蔽域となっているため，顕著な洗堀は生じていない．

4. まとめ

本研究における主な成果を以下に示す．

①建設中のマタバリ石炭火力発電所周辺海域において，定期深浅測量や定点観測データから，現場海域の特徴および航路埋没特性を明らかにした．

②顕著な航路埋没は5～9月の雨季に生じる事を改めて確認した．累計の航路埋没量は事前予測結果にほぼ近い値で推移しているが，実測値をフィードバックしてのモデル検証は十分でなく，今後の課題である．

③濁度観測データから，航路埋没は港外の高濁度に強く起因し，特に高波浪と大潮が重なると，著しい埋戻りを生じる傾向がある．

④港内の堆積土砂はシルト～粘土分が支配的であり，将来の効率的な航路管理を考える上で，浮泥厚のデータは有用と考えられる．

⑤現場海域では外郭施設周辺の洗堀も重要なモニタリング項目の一つであり，北防砂堤先端の港外側で顕著な洗堀が確認された．

参考文献

1) 高江圭作: 海外情報 マタバリ超々臨界圧石炭火力発電所における港湾工事，電力土木(402)，pp.120-122, 2019-07.

2) Sanuki, H., Tsuru, M., Chu, D. T.,Tsurumi, F., Hidaka, O., Araake, T., Abe, Y. and Takae, K.: Access Channel Dredging Works under Heavy Sedimentation Conditions, *Proc. of 10th Int. Conf. on Asian and Pacific Coasts*, 2019.

3) Japan International Cooperation Agency: Preparatory survey on Chittagong Area Coal Fired Power Plant Development Project in Bangladesh Final Report on Power Plant, Port, Transmission Line, access road, execution survey of natural conditions, JICA, Book.1-5(Public edition), 2015-03.

4) ADMIRALTY Tide Tables - South China Sea and Indonesia (Including Tidal Stream Tables), United Kingdom Hydrographic Office, Volume 5, 2018.

5) Isobe, M.: A parabolic equation model for transformation of irregular waves due to refraction, diffraction and breaking, *Coastal Eng. in Japan*, JSCE, Volume30(1), pp.33-47, 1987.

6) Matsumoto, K., Takanezawa, T. and Ooe, M.: Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model: A global model and a regional model around Japan, *Journal of Oceanography*, Volume56(5), pp.567-581, 2000.

7) Partheniades, E.: Erosion and deposition of cohesive soils, *Journal of hydraulics division*, ASCE, Volume91(1), pp.105-139, 1965.

8) Whitehouse, R., Soulsby, R., Roberts, W. and Mitchener, H.: Dynamics of estuarine muds. -A manual for practical applications-, Thomas Telford, 210p., 2000.

9) Soulsby, R.: Dynamics of marine sands. -A manual for practical applications-, Thomas Telford, 249p., 1997.

(Received March 16, 2020)
(Accepted July 27, 2020)

MONITORING OF CHANNEL SEDIMENTATION AT A DEEP SEA PORT IN SOUTHEASTERN PORTION OF BANGLADESH DUE TO ON-GOING CONSTRUCTION

Hiroshi SANUKI, Shuuhei KUROTAKI, Kevin BOBILES,
Akiyuki UKAI, Masahito TSURU, Yuuki ARAAKE, Shinichi NAKAYAMA,
Yoshifumi ABE and Keisaku TAKAE

The full-scale port facility construction has just commenced in Matarbari coal-fired power plant project since Jan/2018. This paper describes the characteristics of sedimentation inside the channel during the dredging process based on the obtained construction data. Results of monthly bathymetric survey show a remarkable sedimentation in the channel during monsoon season from the months of May to September. This observation is found to be in good agreement with the initial simulaion results of sedimentation inside the channel. It is also confirmed through wave and turbidity observations that a signif-icant sedimentation occurs in the channel due to the high turbidity outside the port especially when high waves and spring tide coincide. Furthermore, a silt-clay content in the sediment is found to be dominant inside the port and data on mud thickness was then obtained which can provide useful information for channel management in the future. Moreover, the scouring around the outer structure of the port is one of the important components of site monitoring and a remarkable scouring at the tip of the north sediment mitigation dike is confirmed.