

八代港の埋没実態調査と埋没予測モデルの更新による埋没メカニズムの検討

西潟 智広*・服部 俊朗**・杉浦 幸彦***・成毛 辰徳***・黒澤 一真***・宮本 由郎****
片岡 勝徳*****・緒方 友法*****

* (一財) 沿岸技術研究センター 調査部

** 前 (一財) 沿岸技術研究センター 九州支部

*** いであ(株) 沿岸・港湾事業部

**** 前 国土交通省 九州地方整備局 熊本港湾・空港整備事務所

***** 国土交通省 九州地方整備局 熊本港湾・空港整備事務所

八代港外港泊地・外港航路では従前より、シルテーションによる埋没が生じており、その実態の解明と対策方針の検討が必要となっている。当該地区の埋没メカニズムについては令和5年度より検討が行われてきているが、海象条件、底質条件、河川からの土砂流入条件等に不明な点が多く、埋没の定量評価にはいまだ不十分なところがあった。そこで、本検討では、新たに浮泥流動調査と底質調査を実施し、河川からの土砂供給量についても精度を向上させることで、既往の埋没シミュレーションモデルを更新し、八代港当該地区の埋没メカニズムの把握に努めた。

キーワード：濁りシミュレーション、土砂流出、極値統計解析

1. はじめに

八代港は球磨川河口に位置しており、図-1に示すように内港地区と外港地区に分かれている。そのうち、外港地区泊地は、最大14mの水深まで掘り込んでおり、長期的な埋没が懸念されている。また、外港航路は球磨川河口エリアまで伸びているため、球磨川等の出水により埋没が生じる可能性を孕んでいる。

図-2、図-3に1993年1月から2025年1月まで球磨川の各出水イベント時のピーク流量と各出水時の流下土砂量をそれぞれ示した。これらの図に示すように2020年7月の豪雨時をはじめ、何度かの出水時に河川流下土砂が供給されており、その影響を受けて外港航路、外港泊地等で埋没等による地形変化が生じる可能性がある。



図-1 八代港の泊地・航路と河川位置の関係

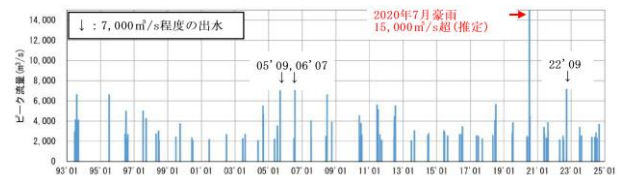


図-2 球磨川における各出水イベントのピーク流量

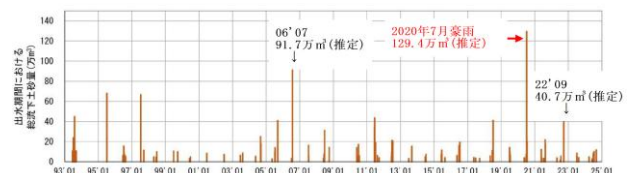


図-3 球磨川における各出水イベントでの期間総流下土砂量

八代港では令和5年度に埋没シミュレーションモデルを構築し、埋没予測を行った。しかし、この解析では、外港航路南側の出水時の埋没量の推定精度が低いことが明らかとなった。

そこで、令和6年度に水深、浮泥流動調査と底質調査を実施し、それらの結果を反映させた新たな埋没シミュレーションモデル(令和6年度モデル)を構築し、再現性について、流況・濁りの連続観測結果、及び豪雨後の埋没実態解析結果とシミュレーション結果と比較した。

上記の検討結果に基づき埋没メカニズムを推定し、八代港における埋没メカニズム図を作成した。

2. 埋没状況の整理

2.1 埋没実態の把握

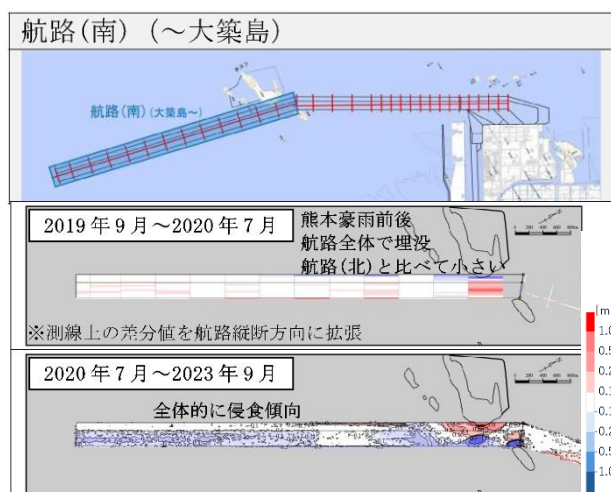
(1) 航路における水深変化実態の整理

航路部の計画水深は-14m であり、主として 2006 年～2016 年の間に浚渫された。なお、外港航路東側の原地盤(河口側)は D.L. -8m 程度、外港航路西側の原地盤は D.L. -12m 程度であり、航路と原地盤の比高は 2～6m 程度となっている。

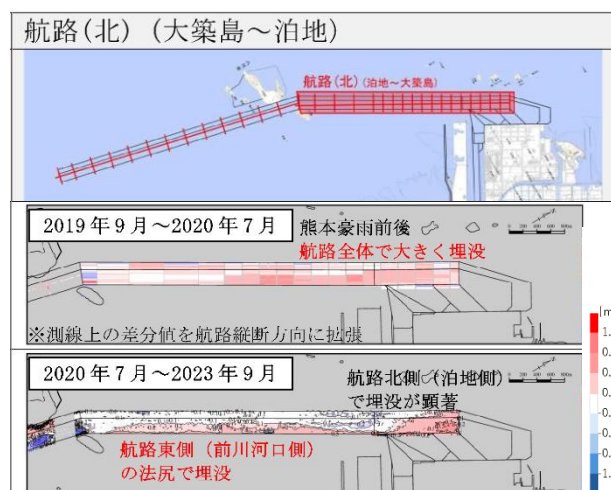
図-4 に外港航路部の 2019 年から約 4 年間の水深の変化を示した。図-4a) は外港航路の南半分(以降、航路(南))の水深の変化の様子を、図-4b) は外港航路の北半分(以降、航路(北))の水深の変化の様子を示したものである。なお、2019 年の深浅測量は測線に沿った簡易的な測量であったため、2019 年の調査に関係した部分については 10m 格子の水深データに変換して整理している。

この調査期間の間には 2020 年 7 月の豪雨以外には目立った出水はなかった。航路(南)に関しては、航路は顕著な出水が発生していない期間では侵食傾向にあり、出水の時(2019 年 9 月から 2020 年 7 月の水深変化の図)に航路(南)が全体的に堆積傾向にあったことがわかる。

航路(北)でも、2020 年 7 月の熊本豪雨による出水で全体的に大きく埋没した。



a) 航路(南)



b) 航路(北)

図-4 航路部の水深の変化の様子(2019 年から 2023 年)
(正：堆積、負：侵食)

2.2 浮遊物質流動量(SS フラックス)と底質の調査

八代港の埋没シミュレーションに資するため、令和 6 年度に新たに八代港内現況調査として、浮泥流動調査と底質の調査を実施した。図-5 に示すように浮泥流動量調査は 3 地点 (St. C-1～3) で 2024 年 8 月 7 日～9 月 23 日に調査を行った。当初は 30 昼夜連続観測を予定していたが、観測中台風の襲来等により 8 月 26 日～9 月 2 日には一時的に機器を撤去し、台風通過後の 9 月 3 日～16 日 (14 昼夜) に再設置し観測を再開した。なお、St. C-1 と St. C-3 では上層 (海面下 1m) と下層 (海底面上 0.5m) の浮泥流動量を観測しており、C-2 は干潟上で水深が浅いため下層 (海底面上 0.5m) のみ観測した。底質調査は 13 地点 (St. B-1～13) で行った。

(1) 浮泥流動量調査

図-6 に台風後の 9 月 3 日～16 日 (14 昼夜) の期間の浮泥流動調査から求めた単位幅あたりの SS フラックスの状況を示す。ここでは、流況及び SS の観測データが鉛直方向に一样 (St. C-1 と C-3 については、水面から海底までの中点より上側に上層の観測データ、下側に下層の観測データをそれぞれ適用した。また、St. C-2 については水面から海底まで下層の観測データを適用した。) の仮定のもとで、推定した。なお、欠測期間中の台風に起因して、図-2 に示している通りピーク流量で 3,500 m³/s 程度の出水が発生したが、台風通過後十分に時間が取れていたためか、ここに示す SS フラックスは台風襲来前の SS フラックスとほとんど違いがなかった。そのため、ここでは、図-6 に示した SS フラックスは平常時の SS フラックスに近いものとして考察する。

図-6 によると、St. C-1 では北北東向きの比較的大きな SS フラックスがあった。このことは、平常時には St. C-1 付近では南から北に土砂が移動している可能性が高いことを示している。

河口付近のSt. C-2とSt. C-3ではSt. C-1に比べるとSSフラックスの量が小さく、また、わずかに岸向きに生じていることがわかった。このことから、平常時には河川流下土砂が航路に堆積する量は小さいと考えられる。

以上の結果を踏まえると、平常時には泊地・航路(北)を南から北に土砂が移動している可能性が高い。また、河口部(St. C-2)及び球磨川前面海域(St. C-3)では岸向きのSSフラックスが卓越しているものの、平常時には河川流下土砂の埋没への寄与は小さいと考えられる。

(2) 底質調査

表-1に各調査地点で採取した土の粒度分布を一覧表として示した。採取した土の粒度分布は採泥地点により異なっていた。図-5の赤丸で囲んだ地点は、比較的砂が多く含まれていた地点であり、具体的には砂分が30%以上含まれていた地点である。それ以外の地点は砂分が30%未満でシルト粘土などの細粒分が主成分となっていた地点である。河口エリアでは、岸に近いほど砂分が多く、沖側は細粒分が主体であった。このことから、河川より流出してくる土砂は分級が進んでおり、岸に近いところでは粗粒分が、遠いところでは細粒分が堆積する環境にあったと考えられる。

以上から、泊地・航路の底質はシルト・粘土が卓越しているといえ、これらのエリアではシルテーションによる埋没が生じていると考えられる。

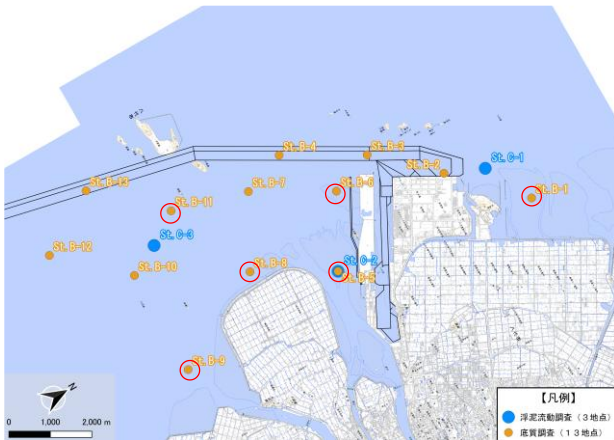


図-5 現地調査地点

表-1 底質分析結果一覧

調査地点	粗砂(%)	中砂(%)	細砂(%)	シルト(%)	粘土(%)
St. B-1	0.0	3.2	81.6	3.6	11.6
St. B-2	0.0	0.3	1.8	81.8	16.1
St. B-3	0.0	0.2	3.0	74.5	22.3
St. B-4	0.0	0.3	7.6	72.2	19.9
St. B-5	0.0	4.8	24.7	58.1	12.4
St. B-6	0.8	45.0	37.4	4.3	12.5
St. B-7	0.0	0.2	2.2	79.5	18.1
St. B-8	31.9	36.1	15.1	5.6	11.3
St. B-9	0.0	2.7	37.0	48.2	12.1
St. B-10	0.0	0.3	5.2	76.5	18.0
St. B-11	1.0	6.0	28.9	45.7	18.4
St. B-12	0.1	0.5	22.6	57.1	19.7
St. B-13	0.0	0.4	11.1	73.0	15.5

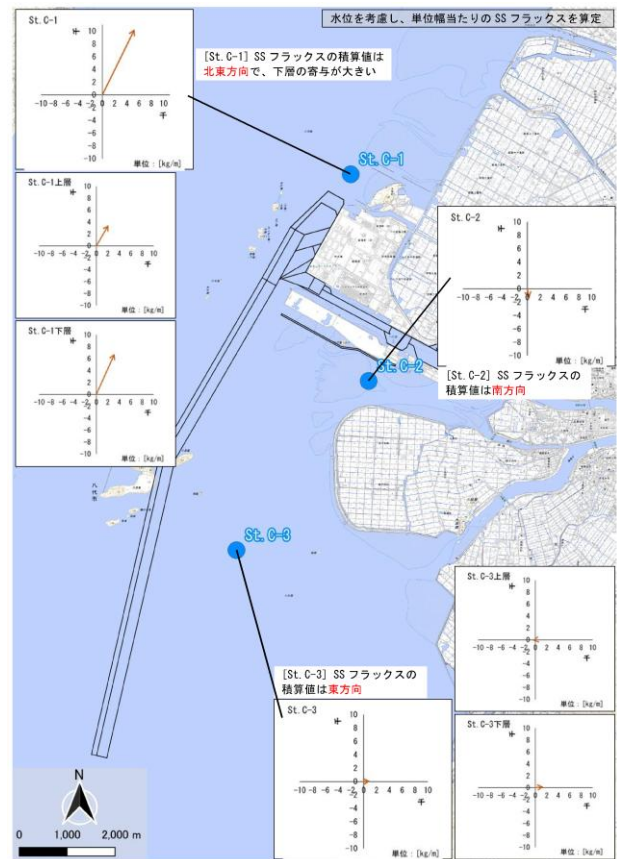


図-6 SSフラックスの積算値の推定結果(台風後:9月3日~9月16日)

3. 埋没シミュレーションモデルの更新

令和5年度に構築された埋没シミュレーションモデル(以降、「令和5年度モデル」)では、潮汐の再現性が悪く、その原因として、長島海峡付近の計算格子が荒いことが懸念された。また、モデル構築のための河道部の地形情報、湾内の流況状況と底質状況の情報が不足していた。そこで、令和5年度モデルをベースとして、表-2に赤字で示すように、1)長島海峡の地形のモデル化(図-7の第4領域)を再検討、2)新たに得られた航路と泊地の水深・底質等の入力条件を更新、3)流況モデルとして鉛直拡散モデルの追加、4)土砂輸送モデルのパラメータの一部見直しを行った。

表-2 埋没シミュレーションモデルの主な計算条件と令和5年度モデルからの変更点

項目	設定値
基礎条件	水平格子 第1領域 1485m 格子、97×73 格子 第2領域 495m 格子、187×94 格子 第3領域 165m 格子、136×166 格子 第4領域 165m 格子、190×127 格子〔追加〕 →長島海峡周辺の計算格子細分化 第5領域 55m 格子、274×124 格子 第6領域 55m 格子、316×175 格子
	鉛直格子 水面から海底までを最大6層で分割 層分割の境界水深: D.L.-4.0m/-7.5m/-11.0m/-14.0m/-17.0m
	水深 主に以下のデータより作成 ・海底地形デジタルデータ M7024 九州 西岸海域 ・海図 W170 八代海北部 ・令和2年度八代港深淺測量 ・令和6年度八代港内現況調査 広域深淺 測量成果
	底質 含泥率は、主に以下のデータより作成 ・八代海における底生生物分布と底質環境 の特性把握 (園田ら,2016) ・海洋環境整備協による定期環境調査結果 ・令和6年度八代港内現況調査 底質調査 結果 含水比は、計算領域全域一様 100%に設定
流況モデル	潮位 海洋潮汐モデル NAO.99Jb の潮汐調和定数を 基に設定 (16 分潮)、潮汐緩和期間(助走期 間)は 12 時間
	河川流入 (河川流 量・河川流下土砂 量) 出水時のみ考慮 (球磨川及び南川、二級河川)
	水平拡散 スマゴリンスキーモデル:スマゴリンスキー 係数=0.08
	鉛直拡散 乱流モデル ($k-\varepsilon$ モデル) →水温・塩分によ る密度流を考慮 水温は全層で26.7℃に設定、塩分は各層で下 記の通り設定 第1～第6層:25.0‰/29.0‰/30.0‰/30.5‰/ 31.0‰/32.0‰
	壁面境界条件 第一領域 Semi-Slip 第二領域 Slip 第三領域 Slip 第四領域 Slip 第五領域 Slip
土砂輸送 モデル	巻上係数 M 0.00021 kg/m ² /min
	巻上限界せん断応 力 τ_c 1.0 dyn/cm ²
	巻上乘数 n 1.0
	沈降速度係数 $A=18.0 \rightarrow 9.0$ 10 ⁻⁴ m ³ /kg/sec、 $B=1.0 \rightarrow 1.2$ 、 $Ch=4.3$ g/L
	沈降限界せん断応 力 τ_d 5.0 dyn/cm ²
	水平拡散 スマゴリンスキーモデル:スマゴリンスキー 係数=0.08
	鉛直拡散 プラントルの距離混合モデル(鉛直拡散係数 =0.4→0.1)
	最下層の沈降濃度 β_{max} 4.0→2.0

※令和5年度モデルからの変更点を赤字で示す

3.1 シミュレーションモデルの再現性向上

すでに述べたように、令和5年度モデルでは、八代海内外の潮汐の位相の再現性に課題があった、そこで八代海の最大の出入口である長島海峡の地形モデルの精度を高めるため、新しいモデルでは、図-7に第4領域として示す長島海峡周辺の計算格子を1/3程度に縮小すること

により長島海峡の地形モデル精度を向上させた。

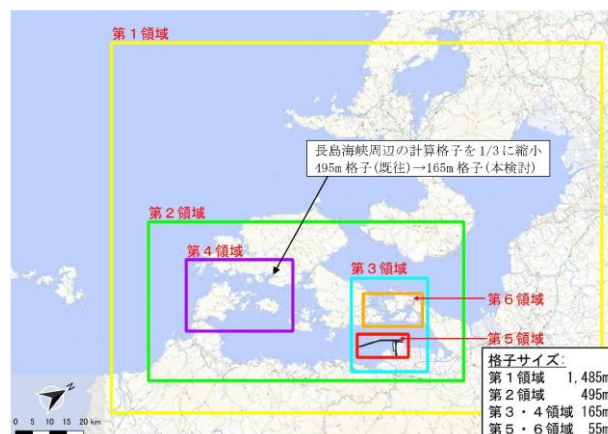
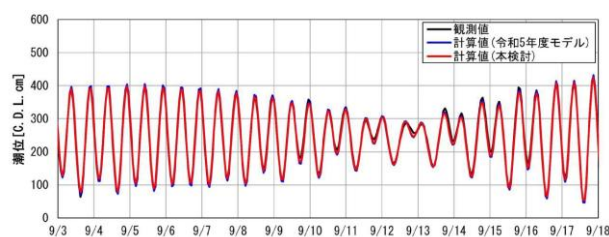
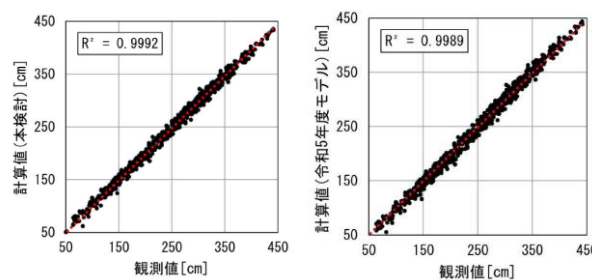


図-7 計算領域の設定

図-8に、2024年9月3日から9月18日までのナウファス八代港における観測潮位の時刻歴データと令和5年度、令和6年度の両モデルの計算値の比較(図-8a)と観測値と計算値の相関性(図-8b、図-8c)の比較を示した。図-8に示したように平常時の潮位の再現性がわずかに改善された。



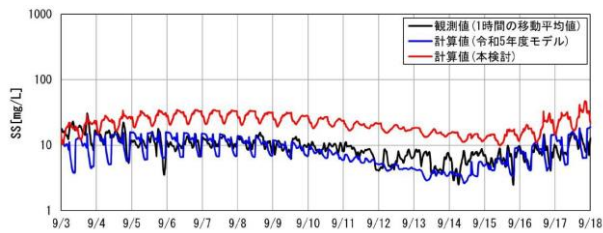
a) 潮汐の時刻歴の比較の例

b) 令和6年度モデルの結果 c) 令和5年度モデルの結果
図-8 潮位の再現計算結果（ナウファス八代港）

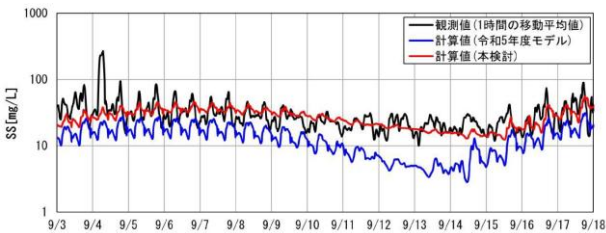
また、浮泥流動調査結果の再現性を確認するため、流速及び濁りの再現計算を実施した。浮泥流動調査を実施した St. C-1～C-3 における流速（東方成分・北方成分）の観測値と計算値を比較することで、再現性を確認した。本検討において、いずれの地点でも観測値と計算値のホドグラフ及び時系列の傾向は概ね一致しており、流速の再現性は良好だった。

濁り (SS) の再現計算について図-9に2024年9月3日から9月18日までの St. C-1 上層と下層について観測値とシミュレーションの結果を例として示した。この結果

によると、下層では本検討の計算結果が令和5年度モデルの計算結果よりもSSの再現性が向上したが、上層では計算値が観測値よりも過大となった。これは観測値は水面下1mの流速値、計算値を水面～D.L. -4mの平均値としたことによる層厚の違いによる影響と考えられる。



a) St. C-1 上層



b) St. C-1 下層

図-9 濁り (SS) の再現計算結果

3.2 出水時の再現性向上

令和5年度モデルでは、出水時における航路南側の埋没の再現性に課題があり、これは球磨川河口部における各種条件（水深、河川流、河川流下土砂量等）の設定が一因であると考えられた。そこで、球磨川河口部の地形、河川流、河川流下土砂量等に関する条件設定を検討し、出水時の再現性向上を図った。

本検討では、熊本豪雨が発生した2020年7月上旬（再現期間：2020年7月1日～7月10日の10昼夜）における航路の埋没を対象に、再現計算を実施した。

まず、当該再現期間における河川流量及び河川流下土砂量の入力条件を作成した。令和5年度モデルでは球磨川と前川のみで条件を設定していたが、出水時は八代海北部からの土砂流入がある可能性があることなどから、本検討では、球磨川、前川のみならず、図-10に示す八代海北部の二級河川も含めて条件を設定した。

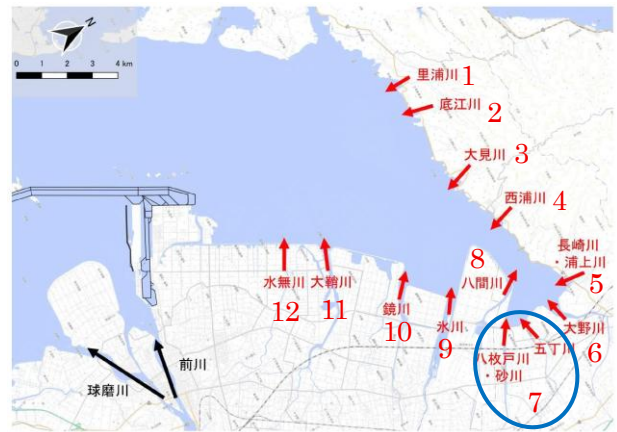


図-10 河川流量・河川流下土砂量の入力条件を設定する河川（赤字：二級河川）

(1) 球磨川及び前川の条件設定

球磨川と前川の河川流量は、図-11に示す球磨川横石における流量観測データを基に設定した。なお、この際、球磨川と前川の流量配分は、図-11に示すように球磨川と前川の計画高水流量を基に球磨川：前川=4:3と設定した。また、河川流下土砂量は、当該河川特有の濁度と流量の関係式(L-Q式)を用いて、流量データから流下土砂量のデータを算定した。

以上を踏まえて、球磨川・前川における再現期間中の河川流量及び河川流下土砂量の入力条件をそれぞれ図-12、13に示した。

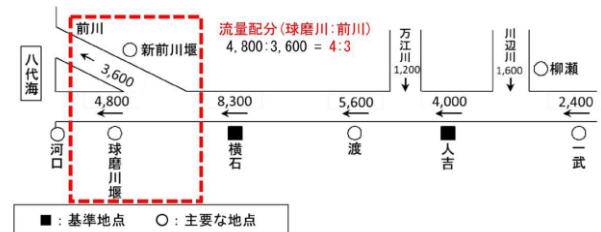


図-11 球磨川及び前川の流量配分（単位：m³/s）

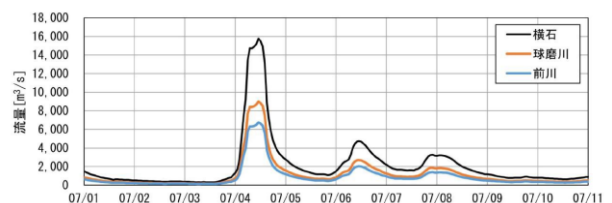


図-12 河川流量の入力条件（球磨川・前川）

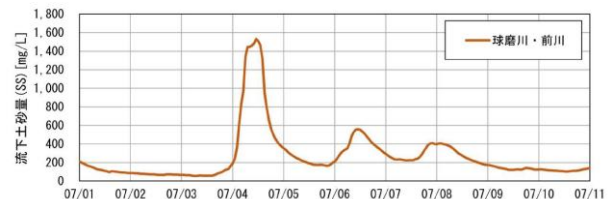


図-13 河川流下土砂量の入力条件（球磨川・前川）

(2) 二級河川の条件設定

二級河川の河川流量・河川流下土砂量に関するデータは無いため、本検討では球磨川と各二級河川の流域面積比を基に二級河川の河川流量を推定し、条件を設定した。なお、計算格子サイズの制約上、五丁川、八枚戸川、砂川では入力データを合算して与えた。その結果として各二級河川における再現期間中の河川流量及び河川流下土砂量の入力条件を図14, 15に示した。

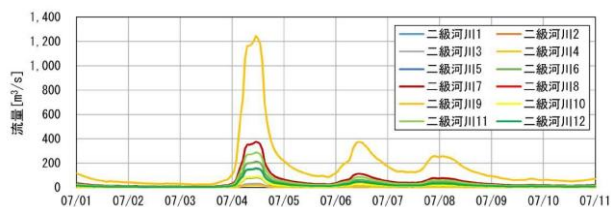


図-14 河川流量の入力条件 (二級河川)

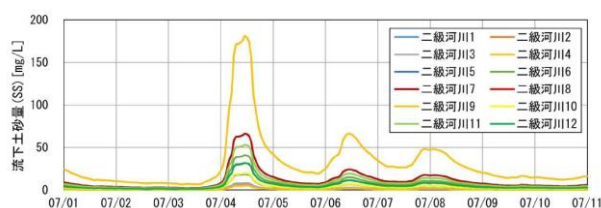


図-15 河川流下土砂量の入力条件 (二級河川)

(3) 出水時の再現性

令和6年度モデルでは、埋没予測シミュレーションモデルの水深条件及び底質条件について、新たに得られたデータを基に計算条件を更新し、実態を反映した。

2020年7月豪雨時の航路の埋没を再現目標として7月1日～7月10日の10昼夜における埋没の再現計算を実施した。当時は航路増深浚渫が完了していなかったことから図-16に示す泊地付近、増深済エリア、未増深エリアの3つの領域に区分けして、図-17に示すように令和5年度モデルとの出水時の埋没の再現性及び精度向上を比較した。

航路(北)では、令和6年度モデルの計算結果が令和5年度の計算結果よりも、実態解析による推定値に近づき、再現性が向上しているといえる。しかし、航路(南)では、計算値が実態解析値よりも過小となっており再現性の向上には至らなかった。

令和5年度モデルを用いた検討においては、外港泊地の北側からの土砂流入が示唆されたが、具体的な土砂流入状況は未解明であった。

そこで本検討では、出水時の再現期間(2020年7月1日～7月10日の10昼夜)を対象に、二級河川を考慮する場合としない場合の2つの条件のシミュレーションを実施し比較することで、二級河川の考慮有無による埋没への影響を確認した。

航路の領域別の埋没量を図-18に示す。航路(北)では、二級河川を考慮した場合の埋没量が考慮しなかった場合の埋没量よりわずかに増加しているが、全体的に顕

著な変化はみられない。

このことから、二級河川による航路の埋没への直接的な影響は確認されなかった。

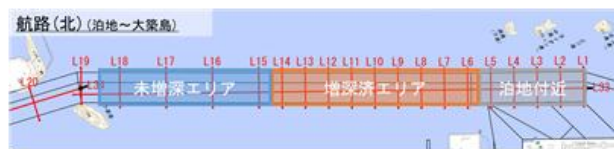


図-16 航路(北) 領域区分

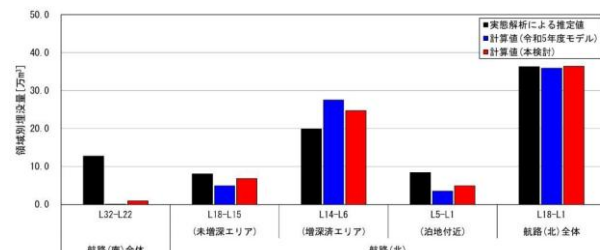


図-17 埋没の再現計算結果 (領域別埋没量)

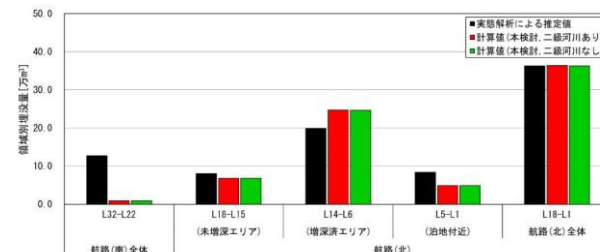


図-18 二級河川の土砂流入を考慮した場合としない場合の埋没への影響 (領域別埋没量)

4. 埋没メカニズム図の更新

図-19に出水時の土砂移動と埋没の状況の概念図を示した。出水時には、前川と球磨川から大量の土砂が供給され、河口テラスの内側に土砂が堆積するほか、航路部にも土砂が流入する。なお、シミュレーションの結果では泊地北側の二級河川からの土砂供給の影響はほとんどないということであったが、この影響の程度については、今後の精査が必要であると考えている。

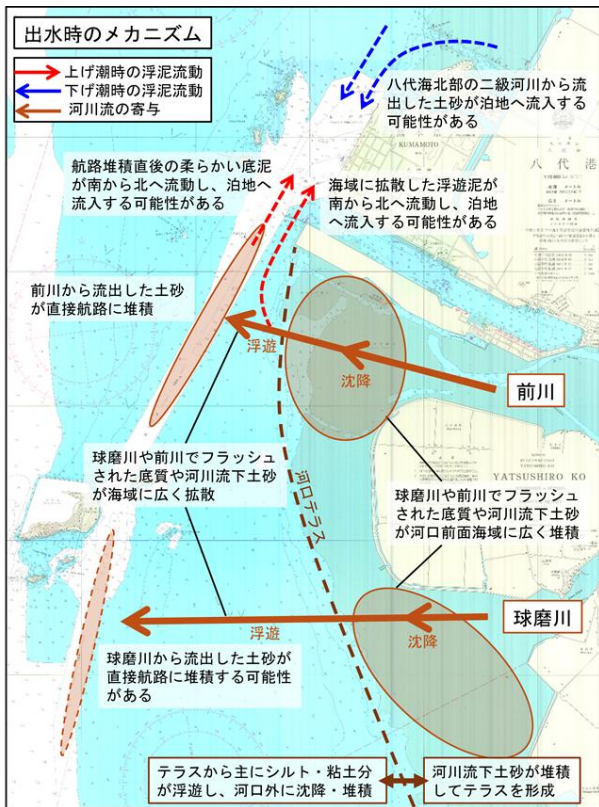


図-19 埋没メカニズムの推定結果（出水時）

参考文献

- 1) 大槻順朗, 川崎貴志, 二瓶泰雄, 鬼倉徳雄: 出水時球磨川における粒径別浮遊土砂輸送特性, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.69, No.4, pp. I_1063-I_1068, 2013. [Otsuki, K., Kawasaki, T., Nihei, Y. and Onikura, N.: Non-uniform suspended-sediment transport in Kumagawa river under flooding conditions, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)*, Vol. 69, Issue 4, pp. I_1063-I_1068, 2013.].
- 2) 鶴谷広一, 村上和男, 入江功, 笹嶋博, 糸井正夫: Fluid mud を考慮した三次元シルテーション予測モデルについて, 海岸工学論文集, 第41巻, pp.1011-1015, 1994. [Tsuruya, K., Murakami, K., Irie, I., Sasajima, H. and Itoi, M.: Three dimensional siltation model considering fluid mud, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, (Coastal Engineering)*, Vol. 41, pp. 1011-1015, 1994.].
- 3) 園田吉弘, 滝川清: 八代海における底生生物分布と底質環境の特性把握, 土木学会論文集B3(海洋開発), Vol.72, No.2, pp.I_1069-I_1074, 2016. [Sonoda, Y. and Takikawa, K.: Characterization of benthos distribution and sediment environment in the Yatsushiro sea, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B3 (Ocean Engineering)*, Vol. 72, Issue 2, pp. I_1069-I_1074, 2016.].

5. おわりに

本業務では八代港(外港地区)における2020年熊本豪雨による河川からの土砂の流入による埋没現象に着目し、航路・泊地の埋没について検討した。

埋没シミュレーションモデルを最新のデータを基に水深条件・底質条件に実態を反映し、計算領域や各種パラメータの設定条件を更新することで、令和5年度に構築されたモデルから令和6年度モデルへ更新を図り、更新した令和6年度モデルは、流況・濁りの連続観測結果、および豪雨前後の埋没実態解析結果との比較により再現性を確認した。

埋没実態の把握及びシミュレーション結果に基づき、埋没メカニズムを推定し、八代港における航路・泊地の出水時の埋没メカニズム図を作成した。

謝辞

本稿は、国土交通省熊本港湾・空港整備事務所発注の令和6年度熊本港湾・空港整備事務所管内埋没検討業務の成果の一部をまとめたものである。

埋没シミュレーションモデルの構築及び埋没量予測式の作成においては、港湾空港技術研究所中川康之特別研究主幹から貴重なご意見とご指導をいただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

