

# 関門航路(南東水道)における埋没メカニズムについて - 効率的な航路整備・維持管理方法の提案 -

納戸 陽大<sup>1</sup>・栞畑 竜志<sup>2</sup>・石橋 悟朗<sup>1</sup>

<sup>1</sup>九州地方整備局 関門航路事務所 海洋環境・防災課 (〒802-0001 福岡県北九州市小倉北区浅野3-7-38)

<sup>2</sup>九州地方整備局 関門航路事務所 工務課 (〒802-0001 福岡県北九州市小倉北区浅野3-7-38)

国の開発保全航路に指定されている関門航路の一部である南東水道は、全長約11km、航路幅700mの航路で、国内外の物流・人流輸送の大動脈となっている。本検討は、長大かつ幅広な航路における複雑なシルテーション埋没現象を解明し、従来の自然外力要因の埋没予測に加えて、新たに人為的影響を考慮した埋没予測手法を構築し、実現象に即した埋没予測を可能とした。そして、現在の供用水深-12mを維持管理すると共に、計画水深-14mまで効率かつ計画的に施設整備していくための施策を提案したものである。

**Key Words:**埋没メカニズム, シルテーション埋没予測手法, 航路開発と水深維持管理

## 1. はじめに (検討の背景)

周防灘の北西部に位置する南東水道は、関門海峡と繋がる関門航路の一部であり (図-1 参照), 直営船であるドラグサクシオン浚渫兼油回収船「海翔丸」による浚渫事業が継続的に実施されてきた。全長約 11km, 全幅 700m の航路は 2019 年現在において水深 D.L.-12m で暫定供用されている。今後は、水深 D.L.-12m を維持管理しながら、計画水深 D.L.-14m への整備・開発を進めていくことが求められている。

整備事業を効果的に推進していくためには、航路への土砂流入による埋没メカニズムを解明し、将来埋没量を実務上必要な精度で予測し、今後の効果的な水深維持管理と施設整備 (増深化) 計画を作成する必要がある。長大かつ幅広な南東水道は埋没による水深変化予測が難しく、事後対応では整備計画の見直しや最適化が困難であった。本検討は、予防保全的な埋没対策と効果的な整備事業の推進に寄与するために行ったものである。

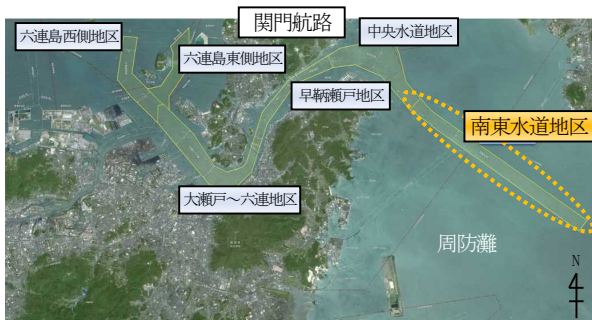


図-1 関門航路と南東水道の位置関係

## 2. 南東水道の埋没現象の検討

### (1) 航路周辺海域の底質分布と埋没土砂流入のイメージ

現地を表層採泥で得られた南東水道航路内と周辺海域の底質の特徴および浮泥移動の現地観測や数値計算から把握できた埋没土砂移動のイメージを図-2に示す。航路内には高含水比のシルト粘土分が堆積しており、浮泥流入によるシルテーション埋没現象が生じている。周辺海域の底質は航路北西側海域では砂泥質であり、下げ潮～干潮時の強い流れで巻き上げられた北西海域の浮泥が航路内に流入しているものと考えられる ((2)で後述)。

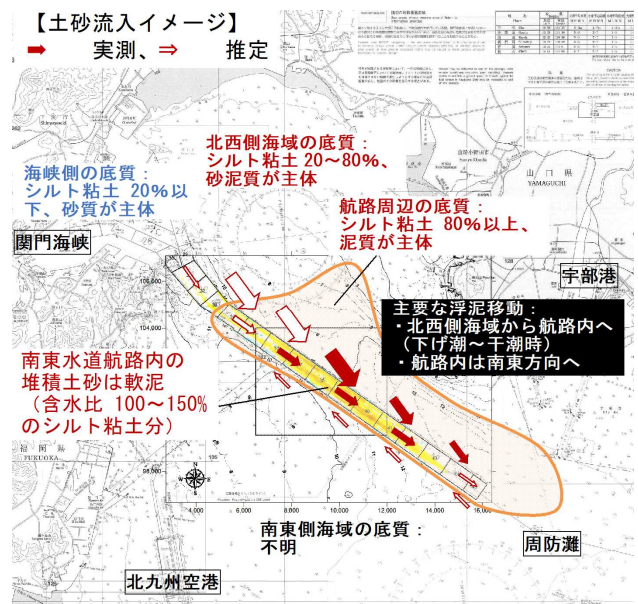


図-2 南東水道・周辺の底質分布と埋没土砂移動のイメージ

(2) 航路縦断—横断方向の埋没特性と要因

a) 航路内の代表的な埋没分布

過去23年間の深淺測量データを解析して得られた南東水道の平均的な埋没量分布を図-3に示す。また、管理ブロック（縦断方向）・区画（横断方向）別の平均的な年間埋没速度の分布を図-4に示す。航路縦断方向に着目すると、南東水道においては中央付近のブロックNo. 39～40で最も埋没量が多い傾向があることがわかる。また、航路横断方向に着目すると、航路北側と航路中央南側の区画の埋没量が多く、航路中央北側と南側の区画の埋没量が少ない特徴があることがわかる。

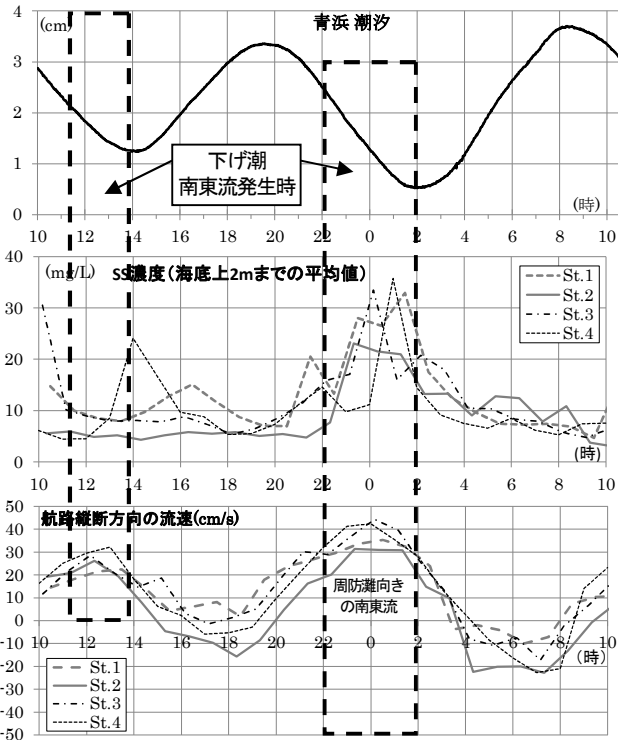
b) 航路縦断方向の埋没特性

図-5はブロックNo.39にて実施された浮泥輸送の現地観測結果であり、上段が潮汐、中段が海底付近のSS濃度、下段が航路縦断方向の流速時間変化である。干潮前の南東流発生時に濁りが最も高まること、航路内底層の浮泥輸送の収支は海峡側から東向きに輸送が卓越している事が読み取れる。この浮泥輸送傾向と図-1と図-2で前述した航路周辺海域の底質分布特性を総合判断すると、下げ潮から干潮時にかけての強い潮流で巻き上げられた北西海域からのシルト粘土分の浮泥流入によって航路縦断方向の埋没分布が生じていると考えられた。

c) 航路横断方向の埋没特性

次に、航路横断方向において埋没量の多い区画は船舶航行が少ない傾向が認められたため、両者の相関関係を分析した。図-6は喫水8m以上の大型船の月間通過隻数（AISデータ解析結果）である。図-4の年間埋没速度分

布と比較すると、船舶航行の多い航路中央北側区画と航路南側区画は埋没量が少ないことが分かる。一方、灯浮標があって船舶航行が非常に少ない航路中央南側区画の埋没量が多い傾向が明確に認められる。すなわち、南東水道内の横断方向の埋没パターンに航行船舶が強い影響を与えている可能性が高いことが確認できた。



※調査地点 (St.1～4) 配置は図-3を参照のこと  
 図-5 南東水道 (No.39) における浮泥輸送の現地観測結果

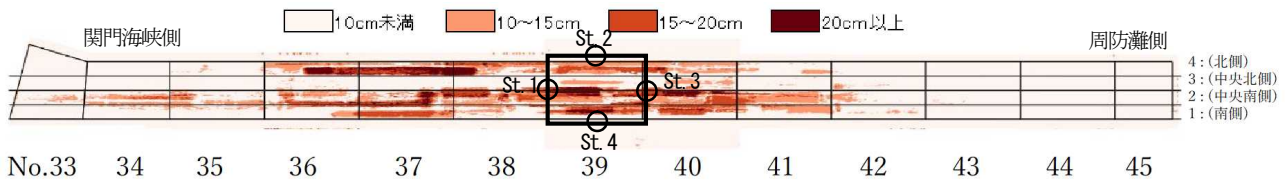


図-3 平均的な年間埋没速度分布

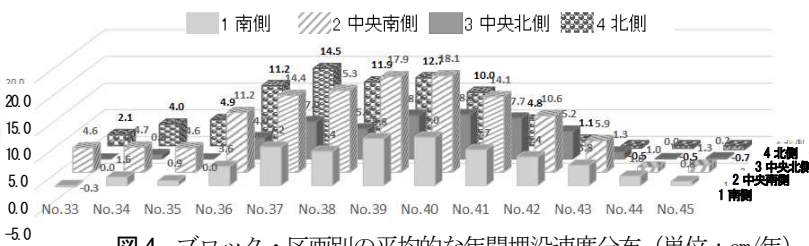


図-4 ブロック・区画別の平均的な年間埋没速度分布 (単位: cm/年)

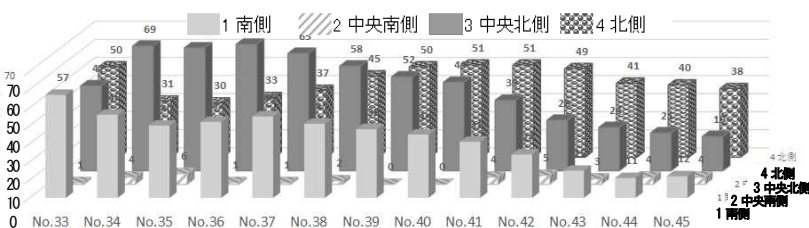


図-6 ブロック・区画別の喫水8m以上の大型船の航行船舶数 (単位: 隻/月)

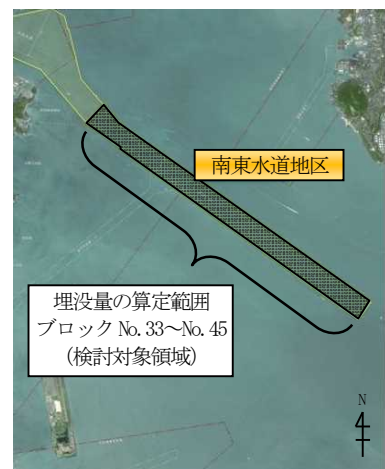


図-7 埋没特性の解析範囲 (図-3～図-6)

#### d) 浚渫に伴う底泥の移動特性

南東水道地区における水深変化の1例として1999年～2001年の水深差分を図-8に示す。図中には「海翔丸」による浚渫範囲を明記している。浚渫域のごく近傍における水深変化に着目すると、図-3で前述した長期的な年平均埋没量と比較して、局所的に顕著な堆積が生じる場合があることがわかった。

浚渫作業と浚渫域周辺における土砂堆積の関係を確認するために、「海翔丸」による浚渫作業中に海底土砂の巻き上げ・移動状況の現地観測を実施した。図-9は濁りの観測結果の一例であるが、浚渫時には海底付近において高濃度の濁りが発生し、時間の経過とともに周辺へ移動している様子が捉えられていた。すなわち、「海翔丸」による浚渫作業に伴って底泥の移動と再堆積が生じているものと考えられた。

次に、近年の浚渫前後の水深変化について、深浅測量データを解析し、浚渫土量と近傍への土砂移動量の関係を整理した。両土量の相関結果を図-10に示す。浚渫時の近傍への土砂移動量は浚渫土砂総量の約33%に相当し、深浅測量データからも浚渫時に浚渫域から周辺域へ航路内土砂移動（再堆積）が生じていることが確認できた。

### (3) 南東水道における3つの土砂移動

(2)の解析結果から、南東水道の深浅測量データの水深差分解析で得られる「見掛けの水深変化（平均埋没量）」は、式(1)に示す3つの自然・人為的要因による埋没・侵食現象の相互作用の結果として生じているものと考えられた。

$$\begin{aligned} \text{「見掛けの埋没量」} &= \\ & \text{「自然埋没量」} + \text{「航行船舶による侵食量」} \\ & + \text{「浚渫時の土砂移動量」} \end{aligned} \quad (1)$$

そこで、第3章以降では、航路の水深維持管理上重要な埋没量として、「実質埋没量」を式(2)のように定義して検討を進めるものとした。すなわち、式(1)に示した3つの土量のうち、「浚渫時の土砂移動量」は航路内で閉じた現象であり、航路内外での土砂収支を考える上では無視できるものと考えた。

$$\begin{aligned} \text{「実質埋没量」} &= \text{「自然埋没量」} \\ & + \text{「航行船舶による侵食量」} \end{aligned} \quad (2)$$

### 3. 新たな埋没予測手法の開発と維持管理上重要な実質埋没土量の推定

#### (1) 潮流等自然要因の埋没予測モデルの構築

シルテーション現象による埋没予測、すなわち、地形変化数値モデルは、下関港湾空港技術調査事務所が開発した海底付近の高濃度浮泥の流動を考慮した多層レベルモデル<sup>12)</sup>をもとに、南東水道の埋没土砂移動に大きな影響を与えている密度流を考慮できるように改良して使用

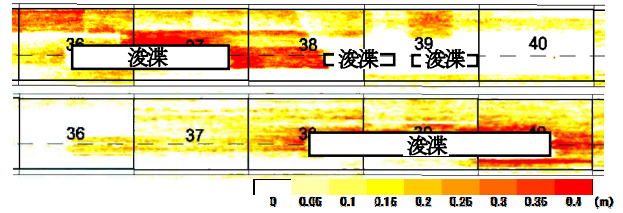


図-8 水深変化図（上：1999～2000年、下：2000～2001年）

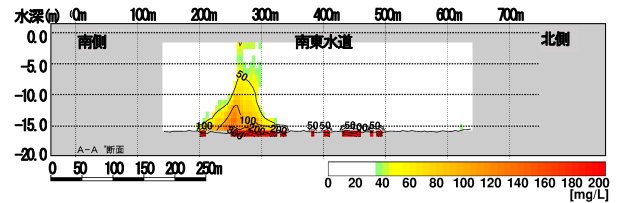


図-9 南東水道における浚渫時の濁りの観測結果

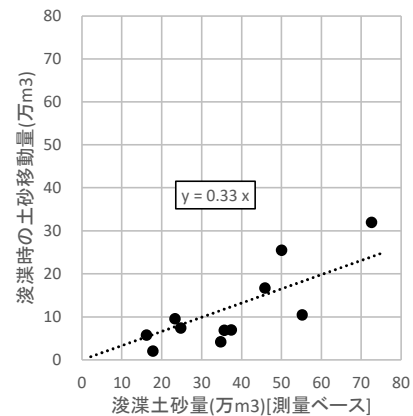


図-10 浚渫土量と近傍への土砂移動量の関係

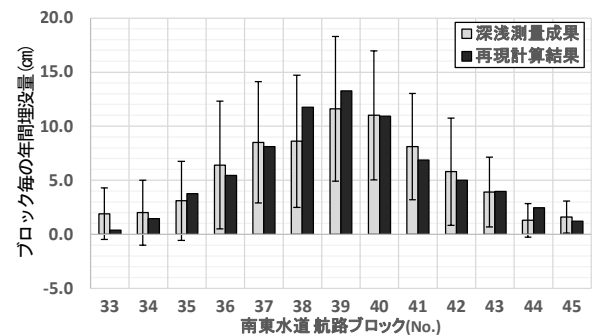


図-11 長期平均的な航路埋没量の再現計算結果

した。地形変化の外力となる流況は、潮汐と海水密度を境界条件として算定した。土砂移動及び地形変化は、流況及び底質のシルト粘土含有率を入力条件として「海底からの土砂の巻き上げ」「潮流による浮泥の移動（移流・拡散）」及び「航路への沈降・堆積」の過程を考慮して計算を実施した。

南東水道におけるブロック別の平均埋没量の計算結果を年間換算したものを図-11に示す。南東水道に適合するように改良した埋没予測モデルを用いることで、潮流等の自然外力で移動して航路へ堆積する細粒土砂による長期間の平均的な埋没量（航路縦断分布）を良好に再現することができた。

## (2) 船舶航行時の土砂移動モデルの構築

航行船舶による土砂移動実態を把握するため、南東水道において複数の船舶通過後の土砂巻き上げ量を取得する目的の現地調査を実施した。そして、中国地方整備局で構築<sup>3)</sup>された航行船舶による土砂移動モデルに適用し、南東水道で適用できるようにモデルの最適化を図った。南東水道における船舶航行時の土砂巻き上げ量の再現計算結果を図-12に示す。各検証ケースにおいて、船舶通過時の底泥巻き上げ量を概ね表現できるようになった。

航行船舶による巻き上げ量の再現性が確認できたことにより、南東水道における航行船舶隻数と土砂移動モデルの巻き上げ量計算結果の線形重ね合わせにより、航行船舶による年間の侵食量を推定することが可能となった。更に、当モデルを活用することで、将来の航行船舶条件の変化や航路整備に伴う水深変化を与条件とした実質埋没量の予測・評価が可能となった。

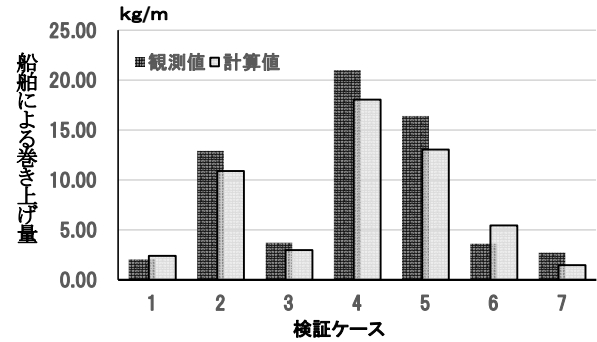


図-12 航行船舶による土砂の巻き上げ量の再現計算結果

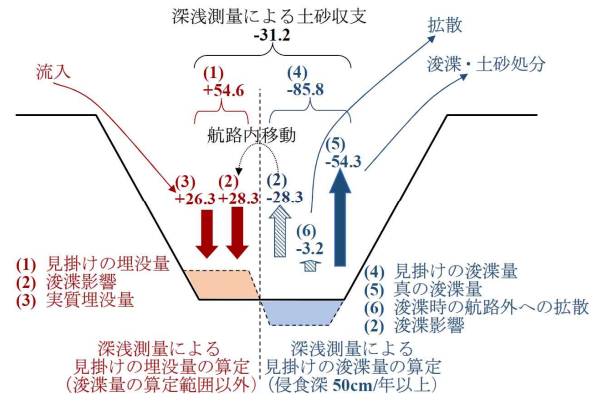


図-13 南東水道の土砂收支イメージ (現況条件)

## (3) 維持管理・整備計画に必要な実質埋没土量の推定

深浅測量による見かけの埋没量・侵食量から、維持管理上浸漑が必要な指標として「実質埋没土量」の推定を行った。現況条件での長期平均的な土砂收支イメージを図-13に示す。まず、長期の深浅測量データから得られる「見掛けの埋没量」+54.6万 $\text{m}^3$ /年のうち、「実質埋没土量」は+26.3万 $\text{m}^3$ /年である。両者の差分の±28.3万 $\text{m}^3$ /年は浸漑時の航路内土砂移動量であり、図-10の結果から「見掛けの浸漑量」の約33%に相当すると想定した。また、「見掛けの埋没量」+54.6万 $\text{m}^3$ /年と「見掛けの浸漑量」-85.8万 $\text{m}^3$ /年の差分、すなわち土砂収支量-31.2万 $\text{m}^3$ /年が平均して増深できている土量に相当する。なお、海翔丸による「真の浸漑土量」は-54.3万 $\text{m}^3$ /年である。

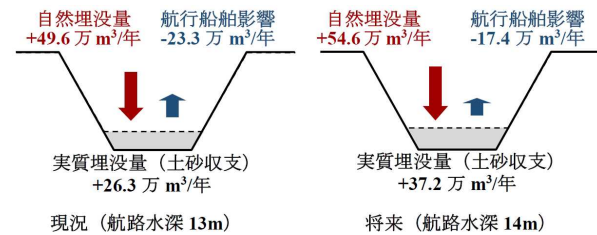


図-14 現況と将来条件の実質埋没量

※ 航行船舶影響は、モデルによる推定値で不確実性がある

## (4) 実用的な埋没予測手法の開発

(3)の実質埋没量と(1),(2)の2つの数値計算モデルを組み合わせることで、自然要因と人為的要因の相互作用を考慮した長大航路の縦断—横断方向の埋没予測が可能となった。図-14は本検討成果で得られた現況 (航路水深13m化) 及び将来 (航路水深14m化) 条件による南東水道全体の実質埋没量の算定結果である。ここで、航行船舶の喫水や隻数は、現況と将来で同一と仮定している。

現況の平均水深に対し、計画水深14mまで増深した将来条件下においては、維持管理すべき実質埋没量が37.2万 $\text{m}^3$ /年に増加する結果となった。これは、増深によって潮流等の自然埋没量が増加すること、船舶のクリアランス (船底から海底までの距離) が大きくなることによって航行船舶の侵食効果が弱まるためである。なお、将来的に供用水深がDL-14mとなって航行船舶の隻数や喫水が増加すれば、航行船舶による堆積土砂の侵食量が増加し、実質埋没量が減らせるものと期待できる。

以上のように、本検討で構築した手法を用いることで各将来条件下における埋没量の定量予測が可能となった。

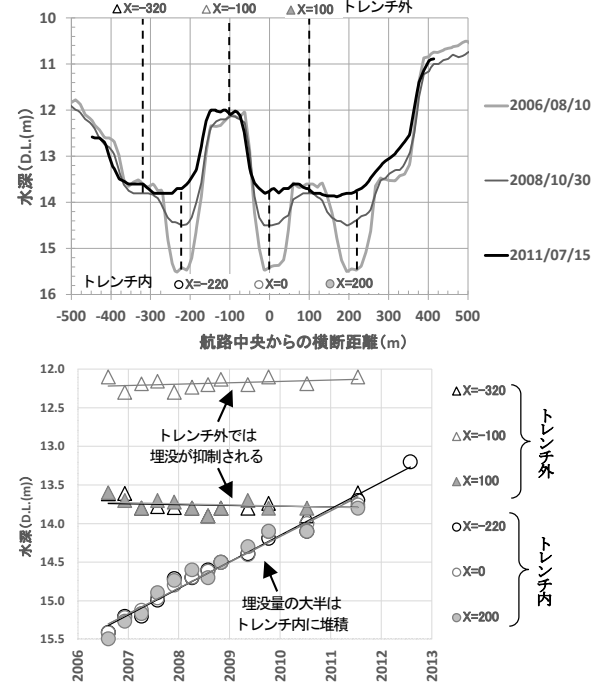


図-15 トレンチ施工前後の水深変化

#### 4. 水深維持管理と増深に向けた検討

##### (1) 既設トレンチ効果の検証

南東水道では維持（増深）浚渫に合わせて周辺より水深の深い「トレンチ（溝）」を試掘し、トレンチによる埋没抑制効果を検証している。南東水道内で最も埋没量が多いブロックNo.39におけるトレンチ施工後の水深変化の推移を図-15に示すが、トレンチ周辺の埋没（浅化）の程度をみると、航路横断3箇所（No.33、No.38E、No.42W）のトレンチ施工後は埋没が抑制されていることが分かる。すなわち、埋没対策としてのトレンチ工法は、初期の浚渫土量が増えるというデメリットはあるものの、埋没を抑制したい重要箇所等の近傍に的確な規模で施工できれば、当該箇所の施設延命化が図れる有効な施策と考えられる。

##### (2) 水深維持管理と増深に関する検討

###### a) 検討の概要と与条件

前述した一連の検討成果を活用し、航路水深、航行船舶及び浚渫土量・時期を与条件として管理区間毎の将来の水深変化を予測した。さらに、水深予測結果を用いて現時点の供用水深-12mと水深-13mの維持管理方法、計画水深-14mの開発必要期間等を検討した。検討条件の概要を表-1に示す。

###### b) 航路開発過程における水深-12m、-13m維持管理方法

2019年の保全測量による最新の航路内水深を初期値とし、現時点の浚渫時の制約を厳守して水深-12mと-13mを維持していく場合の施策を検討した。ここで、浚渫時の制約とは、図-16に示すとおり、施設延長の長さで現行の浚渫能力等から3つの浚渫管理区間が存在する点、各区間で浚渫終了年から次の浚渫開始年まで7年以上の期間を空ける点である。

2つの浚渫の仕方によるブロック・区画別の将来水深の予測結果を図-17に示す。水深-12mに対しては現時点の浚渫スケジュールと浚渫土量で問題なく維持できること、水深-13mに対しては南東水道の東西2つの管理区間では概ね維持可能であることが分かった。一方、中央の管理区間2については、2034年の次のサイクルの浚渫開始年までに浅所が発生するブロックが存在すると予測さ

表-1 水深維持管理方法の主な検討と条件

項目	設定値
初期水深	2018～2019年の水深（深淺測量成果）
埋没量	26.3万m <sup>3</sup> （現況、水深13m化）
	37.2万m <sup>3</sup> （将来、水深14m化） （上記の水深間は線形補間して利用）
浚渫量	33.0万m <sup>3</sup> （1～7年目：陸上排送方式）
	54.0万m <sup>3</sup> （8年目以降：直接投入方式）
目標水深	D.L.-14.3m（南東水道内の平均水深）

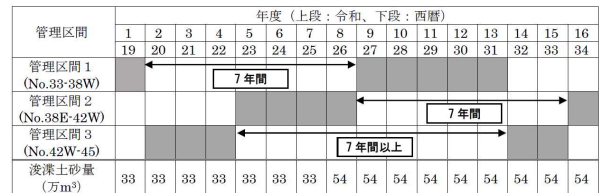


図-16 南東水道における管理区間毎の浚渫スケジュール

れた。その対策として、エリア内を一様に浚渫するのではなく、浅所懸念箇所を重点的に浚渫することで浅所発生を未然に予防できることを示した。

なお、南東水道においては、現行の海翔丸の浚渫能力等を勘案して3つの管理区間の浚渫スケジュールが決められており（図-16参照）、例えば、相対的に埋没量の多い管理区間2の次期浚渫着手は2023年度、管理区間1は2027年度で確定している。したがって、現行浚渫サイクルでの浚渫により、次のサイクルまでに浅所を発生させないことが重要課題となり、本検討成果を踏まえた海翔丸の浚渫能力の最適配分、浚渫能力の向上、および次回浚渫スケジュール見直しのタイミングにおける工程の全体最適化が必要と考えられた。

###### c) 計画水深-14mの開発必要期間

2019年時点の水深を初期値とし、将来想定される平均的な年間埋没土量と浚渫土量の収支から計画水深-14mまでの開発必要期間を概略検討した。図-18に示すとおり、直営測量船「海燕」の測深値が真値（現時点の南東水道の平均水深がD.L.-14.1m）である場合、航路全域があと0.2mほど深くなるまで、すなわち、平均水深がD.L.-14.3mに達するのに約18年必要という結果を得た。

2034年水深(m)	管理区間1						管理区間2						管理区間3					
	区域No.	No.33	No.34	No.35	No.36	No.37	No.38W	No.38E	No.39	No.40	No.41	No.42W	No.42E	No.43	No.44	No.45		
4 北側	14.32	14.30	14.29	14.15	14.09	14.15	13.17	13.21	13.39	13.65	13.83	14.35	14.36	14.35	14.35			
3 中央北側	14.53	14.38	14.42	14.33	14.27	14.31	13.64	13.54	13.51	13.44	13.51	14.31	14.34	14.34	14.34			
2 中央南側	14.25	14.83	14.64	14.17	14.12	14.08	12.90	12.78	12.74	12.93	13.08	14.27	14.29	14.33	14.33			
1 南側	14.39	14.37	14.41	14.38	14.30	14.32	13.60	13.50	13.46	13.52	13.50	14.32	14.32	14.33	14.33			

浚渫エリアを一様に浚渫した場合

2034年水深(m)	管理区間1						管理区間2						管理区間3					
	区域No.	No.33	No.34	No.35	No.36	No.37	No.38W	No.38E	No.39	No.40	No.41	No.42W	No.42E	No.43	No.44	No.45		
4 北側	14.32	14.30	14.29	14.15	14.09	14.15	13.10	13.15	13.35	13.61	13.78	14.35	14.36	14.35	14.35			
3 中央北側	14.53	14.38	14.42	14.33	14.27	14.31	13.63	13.42	13.41	13.38	13.46	14.31	14.34	14.34	14.34			
2 中央南側	14.25	14.83	14.64	14.17	14.12	14.08	13.27	13.16	13.13	13.30	13.46	14.27	14.29	14.33	14.33			
1 南側	14.39	14.37	14.41	14.38	14.30	14.32	13.54	13.36	13.19	13.26	13.21	14.32	14.32	14.33	14.33			

堆積量が多いエリアを重点的に浚渫した場合

図-17 2つの浚渫パターンによる水深予測結果（2034年）

## 5. おわりに（成果と今後の課題）

### (1) 主要な成果（南東水道の埋没対策への提言）

本検討によって、全長約 11km という国内でも非常に長大な南東水道航路の軟泥土砂によるシルテーション埋没現象の実態が明らかになってきた。特に、従来は自然要因の埋没現象のみを扱って埋没予測や対策効果を検討する港湾が殆どであったが、航行船舶や浚渫作業時の土砂移動という人為的な影響を加味することで、実現象に即した埋没予測が可能となった。

前述したとおり、南東水道は、施設延長の長さと同様の海翔丸の浚渫能力等を勘案して3つの管理区間を設定して浚渫スケジュールが決められている。そして、現在の供用水深 DL-12m を維持しながら、全域の水深-13m への展開、最終的には計画水深-14m まで効果的に開発整備を進めていくことが求められている。

本検討で得られた実質埋没量および現時点における海翔丸の浚渫可能土量やスケジュール等を勘案すると、まず、現在の供用水深 DL-12m は今の事業計画にて十分に維持可能であることが分かった。次に、水深 DL-13m に対しては、埋没量の多い南東水道中央付近の管理区間にて浅所発生に注意が必要で、当該エリアの水深状況を注意深く継続監視していくことが重要である。なお、ブロック No.38E~41 については、浅所懸念箇所を重点的に深掘り浚渫することで浅所発生を未然に予防できることも分かった。最後に、埋没土量と浚渫土量の収支で試算すると、2019年時点の南東水道の平均水深 DL-14.1m に対してあと 0.2m ほど深くなる、すなわち、平均水深が DL-14.3m に達するのに最短で約 18 年必要との結果を得た。

### (2)（施設維持管理と整備計画を深化するための）課題

今後も保全測量による水深把握や底質調査による堆積土砂性状の把握を継続実施し、基礎データを蓄積していくことが基本となる。更に、以下の追加調査・検討を実施することで、埋没予測精度が向上し、水域施設の維持管理と開発整備の関連計画を深化させることに繋がるものと考えられる。

- 土砂収支に係る各現象のうち、「自然埋没量」や船舶通過時の航路外への「土砂流出量」などは定量的把握が十分ではない。流れや濁りの時空間変化に着目した現地調査や室内実験等を実施し、推

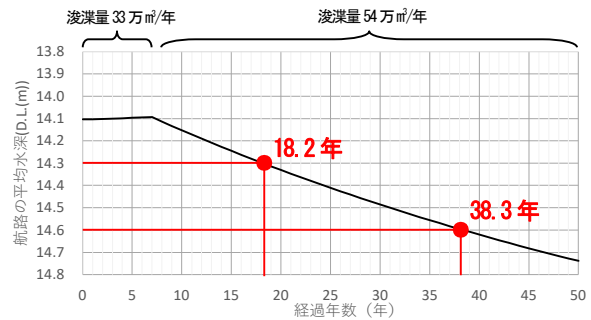


図-18 平均水深の長期予測結果

定土量の精緻化を図る。

- 「航行船舶による底泥の侵食量」は厳密には底質性状や水深で変化すると考えられる。本検討で実施したブロックNo.37と底質や水深が異なる場所において「航行船舶による侵食量」を把握するための濁り等の現地調査を実施し、構築した数値モデルの汎用性を高める。
- 各種土量や解析手法の高精度化を図った上で、将来の船舶航行状況（喫水や隻数の変化）や海翔丸浚渫能力・土捨て可能量の変化を踏まえ、南東水道の埋没予測と航路整備・維持管理計画を適宜更新する。

謝辞：関門航路埋没対策検討会（座長：九州大学大学院橋本典明教授，委員：九州大学大学院 山城賢准教授，海上・港湾・航空技術研究所 中村聡志 席研究官，中川康之 領域長，九州産業大学 横田雅紀 准教授）において助言を頂いた。ここに記し、感謝の意を表す。

### 参考文献

- 1) 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.308-312，1994.
- 2) 国土交通省 九州地方整備局 下関港湾空港技術調査事務所：シルテーションに関する埋没予測計算のための利用マニュアル，2016.
- 3) 国土交通省 中国地方整備局 広島港湾空港技術調査事務所 発注：管内航路・泊地埋没対策等検討業務，2017.