

# 高波浪の発生確率を考慮した埋没量の予測

並木 達也\*・服部 俊朗\*\*・成毛 辰徳\*\*\*・杉浦 幸彦\*\*\*\*・岩下 誠\*\*\*\*\*

\* (一財) 沿岸技術研究センター 調査部 研究員  
 \*\* (一財) 沿岸技術研究センター 調査役  
 \*\*\* いであ(株) 沿岸・港湾事業部 沿岸解析部 主査研究員  
 \*\*\*\* いであ(株) 沿岸・港湾事業部 事業部長  
 \*\*\*\*\* 国土交通省 九州地方整備局 苅田港湾事務所 工務課長

九州東岸の周防灘に位置する苅田港では、シルテーションによる航路・泊地の埋没現象が生じており、水域施設を維持管理する上での課題となっている。埋没する航路・泊地を維持管理するためには、将来の埋没量の予測が重要である。しかし、苅田港の航路では台風の接近（高波浪の発生）の有無により年間埋没量のばらつきが非常に大きく、過去の埋没傾向から単純に将来の埋没量を予測することが困難であることから、高波浪の発生確率を考慮した埋没量の予測手法が求められた。

本検討は、高波浪と埋没量の関係から埋没量の発生確率を推定し、モンテカルロ法により将来の埋没量を予測する手法を検討したものである。

キーワード：シルテーション, 航路埋没, 極値統計解析, モンテカルロ法

## 1. はじめに

有明海や周防灘に面する多くの港湾では、シルト・粘土等の細かい土粒子が海水の流れによって運ばれ、航路・泊地にまともって堆積する埋没現象（シルテーション）が生じており、航路・泊地の維持管理上の課題となっている。周防灘の西部に位置する苅田港においても、シルテーションによる航路の埋没が生じているため、埋没量を考慮した維持管理計画の検討が必要とされている。

本検討は、主に高波浪時の埋没現象が卓越する苅田港の航路（図-1）を対象として、航路の維持管理計画の検討に必要な将来の埋没量について、高波浪の発生確率を考慮した予測手法を検討したものである。検討フローを図-2に示す。

## 2. 波浪と埋没量との関係の解析

### 2.1 外力と埋没量の関係の整理

対象航路における複数の深浅測量成果から、累積埋没量の経年変化を整理して図-3の上段に示す。また、NOWPHAS 苅田の月最大有義波高を図-3の下段に示す。対象航路では、NOWPHAS 苅田の月最大有義波高 2.5m 以上が出現した期間の埋没量が顕著に多くなっており、高波浪時に埋没が卓越していることがわかる。

### 2.2 埋没量推定式の構築

(1) 埋没量推定式の概要

高波浪時の埋没現象が卓越する航路において、将来の

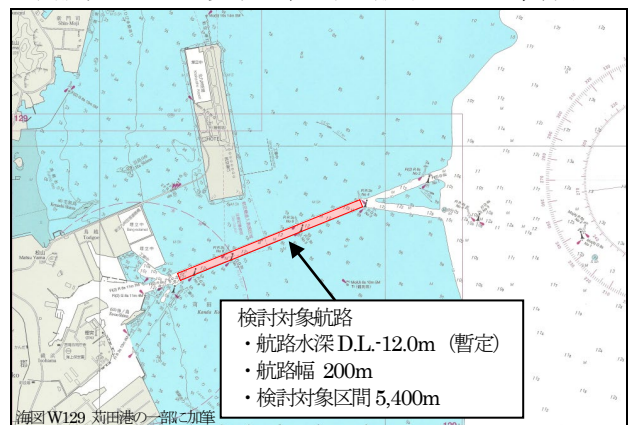


図-1 対象航路の位置図

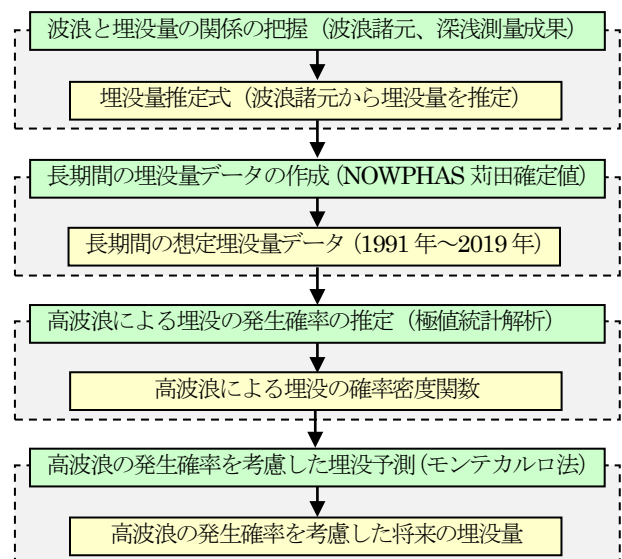


図-2 検討フロー

埋没量を予測するためには、波浪諸元と埋没量の関係を整理する必要がある。そこで、本検討では、NOWPHAS 荇田の波浪諸元から対象航路の埋没量を推定可能な埋没量推定式を検討する。

(2) シルテーションによる巻き上げの式

高波浪時のシルテーションは、波浪による底面剪断応力が底質に作用することにより底泥が巻き上がり、これが潮流等の流れに乗って移流・拡散・沈降することにより、航路等の埋没が生じるものと考えられる。

Odd and Owen(1972)<sup>1)</sup>や鶴谷ら(1989)<sup>2)</sup>のシルテーションモデルでは、巻き上げ量は式(1)で表現されている。

$$\begin{cases} E = M \left( \frac{\tau}{\tau_e} - 1 \right)^n, & \tau \geq \tau_e \\ E = 0, & \tau < \tau_e \end{cases} \quad (1)$$

ここに、 $E$ は泥の巻き上げ量、 $M$ は巻き上げ係数、 $\tau$ は底面剪断応力、 $\tau_e$ は巻き上げ限界底面剪断応力、 $n$ は巻き上げ乗数である。

(3) 埋没量推定式の式形の検討

高波浪時の埋没量  $V_w$ は、近似的には、おおむね底質の巻き上げ量に比例すると考えられる。そこで、式(1)の  $E$ を高波浪時の埋没量  $V_w(\text{m}^3/\text{s})$ に、 $\tau$ を波浪諸元の関数に置き換えて埋没量推定式を構築する。

底泥の巻き上げ式に使われている底面剪断応力  $\tau$ は、波高・周期・水深等の関数であり、おおむね波高の二乗に比例する。本検討では、底面剪断応力と置き換える波浪諸元の関数として、波高・周期・水深の関数で波高の二乗に比例する、波浪のエネルギーフラックス  $W(\text{kW}/\text{m})$ を用いる。埋没量推定式を式(2)に示す。

$$\begin{cases} V_w = A \left( \frac{W}{W_e} - 1 \right)^B, & W \geq W_e \\ V_w = 0, & W < W_e \end{cases} \quad (2)$$

ここに、 $A$ は埋没量係数( $\text{m}^3/\text{s}$ )、 $W_e$ は埋没限界エネルギーフラックス( $\text{kW}/\text{m}$ )、 $B$ は埋没乗数である。波浪のエネルギーフラックス  $W$ は、式(3)<sup>3)</sup>により算定する。

$$W = 0.442 H_{1/3}^2 T_{1/3} D \quad (\text{海水の場合}) \quad (3)$$

$$D = \left( 1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \tanh kh \quad (4)$$

ここに、 $H_{1/3}$ は有義波高(m)、 $T_{1/3}$ は有義波周期(s)、 $k$ 波数、 $h$ は水深(m)である。

対象航路では高波浪時だけではなく、平常時にも若干の埋没が生じている。そこで、本検討では、総埋没量  $V(\text{m}^3/\text{s})$ について、高波浪時の埋没量  $V_w$ と平常時の埋没量定数  $V_c(\text{m}^3/\text{s})$ の和として、式(5)で算定する。

$$V = V_w + V_c \quad (5)$$

(4) 埋没量推定式のパラメータ設定と妥当性の確認

NOWPHAS 荇田の波浪の2時間毎のデータと、対象航路の累積埋没量の経年変化データ(図-3)を用いて、各測量期間における埋没量推定式による推定埋没量と深浅

測量による実績埋没量が最も適合するように、埋没量推定式のパラメータ ( $A$ ,  $B$ ,  $W_e$ ) と  $V_c$ を設定する。

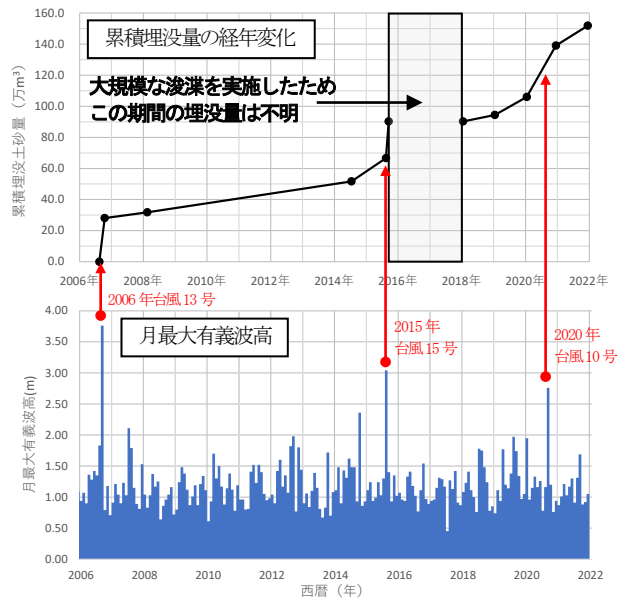


図-3 対象航路の累積埋没量の経年変化とNOWPHAS 荇田における月最大有義波高の関係

表-1 埋没量推定式のパラメータ

パラメータ	設定値
埋没量係数 $A(\text{m}^3/\text{s})$	6.10
埋没量乗数 $B$	1.00
埋没限界エネルギーフラックス $W_e(\text{kW}/\text{m})$	9.00
平常時の埋没量定数 $V_c(\text{m}^3/\text{s})$	$1.05 \times 10^{-4}$

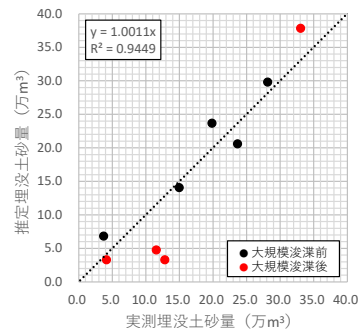


図-4 推定埋没量と実績埋没量の比較 (各測量期間)

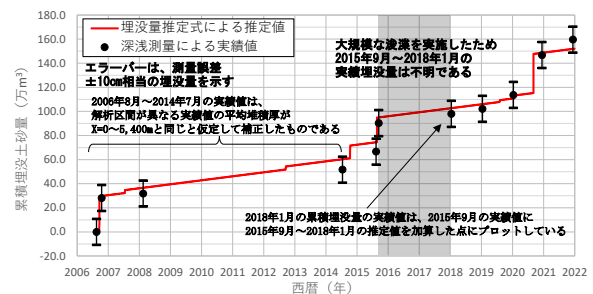


図-5 埋没量の経年変化の再現性の検証

設定したパラメータを表-1に示す。また、埋没量推定式による推定埋没量と深浅測量による実績埋没量を比較して図-4に示す。推定埋没量と実績埋没量の決定係数  $R^2$ は0.95、回帰直線の傾きはほぼ1.0であり、埋没量推定式により期間埋没量の実績が表現できている。

埋没量推定式による累積埋没量の経年変化の検証結果を図-5 に示す。埋没量推定式は、対象航路における累積埋没量の経年変化を表現できており、埋没量推定式による累積埋没量は、全ての測量時期において深浅測量による一般的な測量誤差(±10cm)から推定される実績値のエラーバーの範囲内に収まることがわかる。また、2019 年度までの実績により構築した埋没量推定式を2020 年台風 10 号に適用したところ、埋没量の推定結果は実績値に対して誤差 8%と良好な再現性を示した。

したがって、本検討で構築した埋没量推定式により、NOWPHAS 荻田の波浪諸元から対象航路における埋没量を推定することが可能となったといえる。

### 2.3 長期間の埋没量データの作成

高波浪の発生確率を考慮して将来の埋没量を推定するための基礎資料として、NOWPHAS 荻田における 1991 年の観測開始日から 2019 年末まで 2 時間毎の波浪観測データ(確定値データ)と埋没量推定式を用いて長期間の想定埋没量データを作成する。想定埋没量とは、現況地形と同一条件の対象航路が統計期間中に存在していたものと仮定した場合に埋没したと想定される量である。なお、地形が変化する場合や埋没対策を実施した場合の埋没量を推定する際には、別途シミュレーション等も実施する必要がある。

長期間の累積埋没量の推定結果を図-6 に示す。また、NOWPHAS 荻田における同期間の月最大有義波高を図-7 に示す。対象航路においては、高波浪の発生の有無により、顕著な埋没が生じている時期や、数年にわたり緩やかに埋没している時期があることがわかる。

推定した埋没量について、要因別(高波浪時、平常時)に年間埋没量を集計した結果を図-8 に示す。平常時の埋没量は各年で一定であり、3.3 万 m<sup>3</sup>/年となった。高波浪時の埋没量は、最大の 2004 年には 82.0 万 m<sup>3</sup>/年(平常時と合計で 85.3 万 m<sup>3</sup>/年)となり、また台風等による高波浪が生じなかった年には 0(平常時と合計で 3.3 万 m<sup>3</sup>/年)となった。

## 3. 高波浪による埋没の発生確率の推定

### 3.1 埋没量の極値統計解析

長期間の埋没量の推定結果より、統計期間において高波浪による埋没が生じた全 26 擾乱を抽出した。抽出結果より、埋没量順位上位 8 位までを表-2 に示す。

高波浪による埋没量の出現確率を把握するために、埋没量の極値統計解析を実施する。極値統計解析は、波高の極値統計解析と同様の手法を用い、REC 基準と DOL 基準を満足する分布型の中で MIR 基準で  $\Delta r/\Delta r_{mean}$  が最小の分布型を採用する。

ここに、

$$\Delta r : 1 - r \text{ (相関係数の残差)}$$

$\Delta r_{mean}$  : 極値分布毎の相関係数の残差の平均値

埋没量の極値統計解析結果を図-9 に示す。検討の結果、対象航路における埋没量の極値分布関数は、ワイブル分布  $k=0.75$  となった。

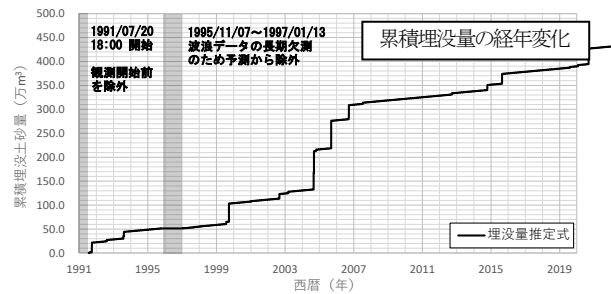


図-6 対象航路の想定累積埋没量の経年変化(推定値)

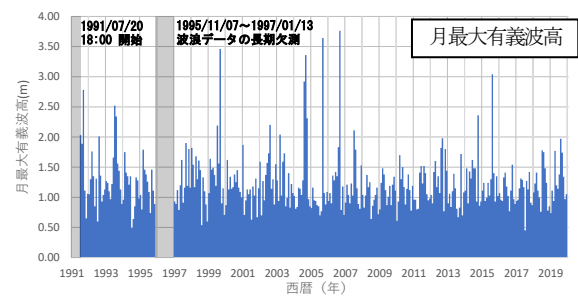


図-7 NOWPHAS 荻田における長期間の月最大有義波高

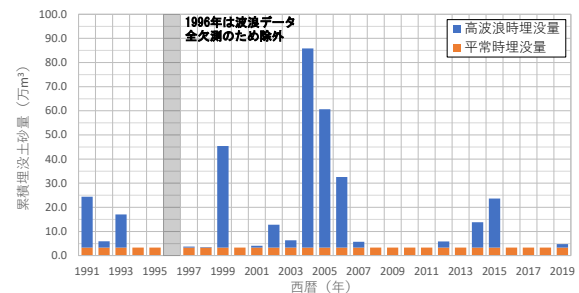


図-8 対象航路における年間埋没量の推定結果

表-2 高波浪による埋没量順位(上位 8 位)

順位	埋没ピーク日時	埋没量(万 m <sup>3</sup> )	擾乱要因
1	2005/09/06 14:00	57.35	台風 0514 号
2	2004/09/07 12:00	44.48	台風 0418 号
3	1999/09/24 08:00	37.80	台風 9918 号
4	2004/08/30 14:00	35.09	台風 0416 号
5	2006/09/17 20:00	29.07	台風 0613 号
6	2015/08/25 08:00	20.33	台風 1515 号
7	1991/09/27 16:00	19.82	台風 9119 号
8	2014/10/13 08:00	10.49	台風 1419 号

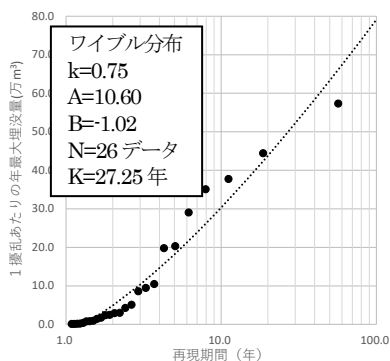


図-9 対象航路における埋没量の極値統計解析結果

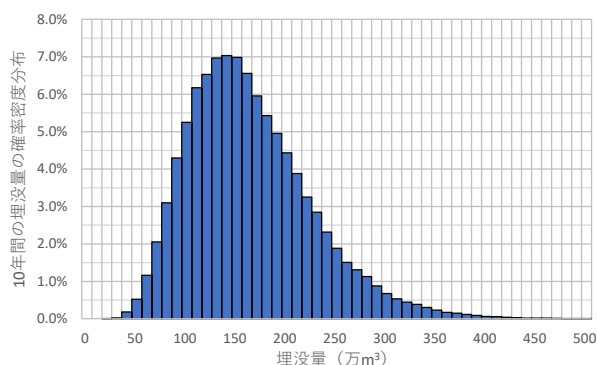


図-11 対象航路の10年間の埋没量の確率密度分布

### 3.2 年最大擾乱による埋没量の発生確率の算定

極値統計解析結果より、対象航路における年最大擾乱による確率埋没量を表-3 に、埋没量の超過確率分布を図-10 に示す。

表-3 対象航路における確率埋没量（高波浪時）

再現期間	1 擾乱あたりの埋没量
1 年	—
2 年	4.90 万 m <sup>3</sup>
3 年	10.31 万 m <sup>3</sup>
5 年	18.19 万 m <sup>3</sup>
10 年	30.33 万 m <sup>3</sup>
20 年	43.80 万 m <sup>3</sup>
30 年	52.20 万 m <sup>3</sup>
50 年	63.27 万 m <sup>3</sup>
100 年	79.09 万 m <sup>3</sup>

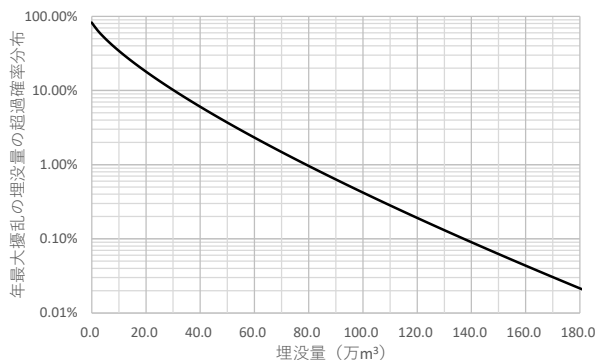


図-10 年最大擾乱による埋没量の超過確率分布

## 4. 高波浪の発生確率を考慮した埋没予測

埋没量の極値統計解析結果（確率密度関数）を用いて、モンテカルロ法により 10,000 ケースの予測を実施し、この結果を統計処理することにより、10 年間の埋没量の確率分布を算定する。顕著な埋没を伴う擾乱の発生回数は、過去 27 年間で最大年 4 回であったことから、モンテカルロ法のタイムステップは 0.25 年（年 4 回）とした。なお、埋没量には、高波浪時の埋没量に平常時の埋没量（3.3 万 m<sup>3</sup>/年）を加算する。

10 年間の埋没量の確率密度分布の算定結果を図-11 に示す。この結果から、高波浪の発生確率を考慮した将来の埋没量のアンサンブル平均値 15.9 万 m<sup>3</sup>/年（10 年間で 159 万 m<sup>3</sup>）が得られた。

## 5. 本検討の成果と課題

### 5.1 本検討の成果

本検討の成果は、以下のとおりである。

(1) 埋没量推定式の構築

対象航路における埋没量と波浪のエネルギーフラックスの関係を示す式を構築した。

(2) 高波浪時の埋没量の推定

埋没量推定式を構築することにより、NOWPHAS 苅田の波浪諸元から深浅測量成果を待たずに埋没量が精度良く推定することが可能となった。

(3) 確率埋没量の把握

埋没量の極値統計解析を実施し、対象航路における確率埋没量を把握した。これにより、台風等により大量の埋没が生じた際の災害査定等に活用可能となった。

(4) 高波浪の発生確率を考慮した埋没量の推定

モンテカルロ法により、高波浪の発生確率を考慮した 10 年間の埋没量の確率分布を推定した。これにより、埋没量のアンサンブル平均と埋没量の上位推計値（非超過確率 95%）を算定し、維持管理計画に用いる航路の劣化予測に反映することが可能となった。

### 5.2 今後の課題

本検討により、高波浪の発生確率を考慮した埋没量の確率分布にはかなりの振れ幅があることが明らかとなったことから、今後、これを航路の維持管理計画に適切に反映する方法を検討する必要がある。

## 6. おわりに

本検討においては、有識者によるヒアリングを実施し、そこでの意見を踏まえながら検討を実施した。

本手法が、シルテーションによる埋没問題に悩まされている諸港湾において一助になれば幸いである。

### 謝辞

本稿は、国土交通省九州地方整備局苅田港湾事務所発注の苅田港埋没対策技術検討業務の成果の一部をまとめたものである。検討にあたっては、港湾空港技術

研究所の中川領域長，九州地方整備局苅田港湾事務所の関係者から貴重なご意見，ご指導をいただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

### 参考文献

- 1) Odd, N. V. M. and M. W. Owen : A two layer model of mud transport in the Thames estuary, Proc. Inst. Civil Eng., Supp. 9, Paper 75175, 1972.
- 2) 鶴谷広一，村上和男，入江功：多層レベルモデルによる航路埋没の予測計算，海岸光学論文集，第36巻，pp. 379-383, 1989.
- 3) 田中博通：波力発電 -課題と展望-，日本エネルギー学会機関誌 えねるみくす，98，pp. 147-153, 2019.

