

研 究 報 告

令和 8 年 4 月 16 日

公益財団法人 前田記念工学振興財団

理 事 長 岸 利 治 殿

研究代表者

所 属 : 熊本大学大学院先端科学研究部

氏 名 : 稲垣 直人

研究課題名 : 作濤工を用いた自然営力による浅海域の底泥誘導の可能性

助成金額 : 1 0 0 万円

研究実施期間 : 自 令和 7 年 4 月 1 日 ~ 至 令和 8 年 3 月 3 1 日

作濬工を用いた自然営力による浅海域の底泥誘導の可能性

Possibility of guiding fine sediments in shallow waters driven
by natural forcings over a seafloor trench

熊本大学先端科学研究部 助教 稲垣 直人

(研究計画ないし研究手法の概略)

1. 背景

有明海をはじめとする閉鎖性水域ではシルト・粘土などの底泥が堆積し、水環境保全や沿岸災害の視点から解決が必要な課題となっている。浚渫工が主たる対策だが、船舶航行や土砂廃棄地の容量の点で限界があり、さらに極浅海域での重機の使用が困難な場合が多い。他方で、極端気象による河川出水や将来的な海面上昇を考慮すると、従来対策とは異なる発想も検討すべきである。そこで本研究では、自然営力を活かした取り組みに注目する。具体的には、作濬工(トレンチ工)に焦点を当て、河口から沖にかけて「海底に川を引く」ことで潮流を促進して底泥を誘導する可能性を探る。

本研究は、そのパイロット段階に位置づけられる。具体的には、海洋流動の計算スキームに潮位変動による干出・冠水を表現する物理過程を導入し、潮位変動過程において異なる流動モードを潮位周期に渡ってシームレスに計算する数値モデルの開発を目標とした。

2. 研究方法

2-1. 支配方程式と離散化

潮汐サイクルにおける海洋流動モードを図 1 に示す。モード遷移を連続的に処理するために、運動量フラックスに下記に示す関数 ϕ を導入した。

$$\phi = \begin{cases} 0 & (H < H_{dry}) \\ (H - H_{dry}) / (H_{wet} - H) & (H_{dry} \leq H \leq H_{wet}) \\ 1 & (H > H_{wet}) \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 H_{dry} と H_{wet} は干出と冠水を判定する閾値となる全水深であり、本研究では一貫して $H_{dry}=0.001$ [m]、 $H_{wet}=0.01$ [m]を用いた。これを用いて、デカルト座標系において水深積分した浅水流方程式を書き下すと、

$$\frac{\partial(\phi H u)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\phi H u u + \frac{1}{2} \phi g H^2 \right) + \frac{\partial}{\partial y} (\phi H u v) = -\phi g H \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} + \phi f H v + \phi A_H \nabla^2 (H u) \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial(\phi H v)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\phi H u v) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\phi H v v + \frac{1}{2} \phi g H^2 \right) = -\phi g H \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho} + \phi f H u + \phi A_H \nabla^2 (H v) \quad (2.2)$$

ここで、 h は静水状態の水深、 H は全水深、 $\rho = 1025$ [kg/m³]は海水密度、 $f = 7.7$ [1/s]は熊本県海域におけるコリオリパラメータ、 $A_H = 1.0$ [m²/s]は水平渦動粘性係数、 τ_b は底面摩擦力で Manning 粗度係数 $n = 0.025$ [s/m^{1/3}]を用いて定式化した。空間離散化はスタグガード格子を用い、時間発展には SSP-RK3 法を用いた。境界条件として、開境界に特性曲線法に基づく無反射境界を導入した。これは M₂ 分潮(半日周期)の潮汐を導入する一般的なアプローチである。なお、本研究は有明海湾

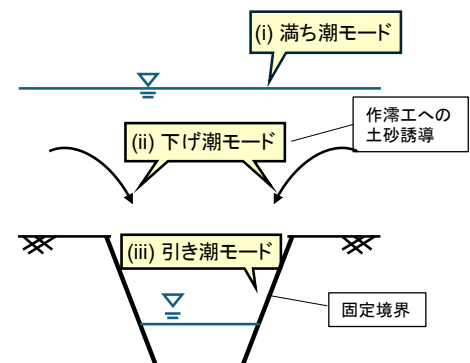


図 1. 流下モード遷移の概念図

奥のような静穏な浅海域での適用を想定しており、本モデルでは波の影響を考慮しなかった。

2-2. モデルの検証

2-1 で示した海洋流動モデルを矩形に理想化した湾に適用し、モデル検証を実施した。流動場のエネルギー収支(図 2)から、三周期のスピンアップを設けることが妥当だと考えられる。干出が生じる条件に付いても同様の検証結果を得た。

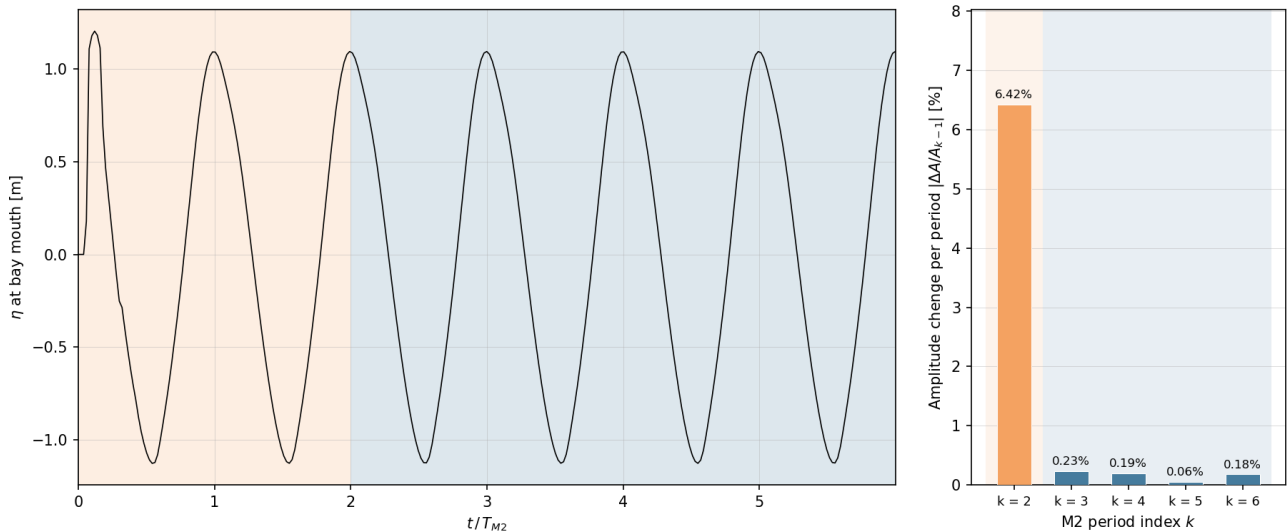


図 2. 潮汐振幅による潮汐周期毎のエネルギー評価

2-3. 作濇工形状・配置に関するパラメトリック検証

作濇工の断面形状を定義する幾つかのパラメータを変化させ、一潮汐周期における流下能力を評価する。一般的に、潮汐により干出と水没を繰り返す底泥はサクシオンによって安定化する。このため、沖方向への底泥誘導を実現するためには、一周期での流下性能を評価すれば十分である。

本研究では、作濇工の各パラメータの変化と流下性能を直接結び付けて評価を行うため、実地地形ではなく、ある程度単純化した地形を用いて検討した。海底地形には $1/2500$ の一定の沖向き傾斜を設け、最も岸側の水深は 1.0m 、沖側の水深は 6.0m となる。この設定は有明海湾奥の基本的な地形条件を参考にしており、大潮の干潮時(潮汐振幅 $A=2.0\text{m}$)に岸沖方向に 400m の領域が干出する。計算領域は岸沖方向に 2000m 、沿岸方向に 1000m とし、格子間隔は 10m 四方のメッシュとした。境界条件は、沖側を開境界、岸側を固定境界、沿岸方向を周期境界とした。

濇筋が岸側の干出領域と冠水領域に渡るように中心を $x=600\text{m}$ に配置し、長さを 1000m とした。作濇工の断面形状を定義するパラメータとして、幅 W 、掘削深さ D 、岸沖方向からの方向角 α 、濇筋底面の沖向き勾配 S を用いた。このうち、 S は作濇工内に捕捉された底泥粒子を沖方向に輸送する駆動力となり、干出領域では(2.1)、(2.2)の支配方程式によって河川流のような挙動になる。なお、作濇工の法面勾配は、底泥の安定化を防ぎ濇筋内に流下させるために大きめの勾配に設定する必要がある。本研究では 45° を用いたが、実際には有明粘土の物性(粘着力や流動化の可能性など)を考慮する必要がある、これは発展余地としたい。

以上より、計算ケースを表 1 にまとめる。

表 1. パラメトリック検証で変化させるパラメータとその設定値

パラメータ	ケース設定値
潮汐振幅 A [m]	1.0 (小潮), 2.0 (大潮)
幅 W [m]	20, 50
掘削深さ D [m]	1, 2, 5
方向角 α [°]	0, 15, 30, 45
滞筋底面勾配 S	1/2500, 1/1250, 1/1000

有明海では大潮時に局所的に 6m 近くの干満差がみられる地点があるが、本研究では有明海および八代海でのより一般的な検討を行うために、振幅 2.0m とした。

2-4. 流下能力の評価

潮汐一周期を満ち潮フェーズと引き潮フェーズに分割し、作滞工内の正味の冲向き体積フラックス ΔQ および流量比を算出した。

$$\Delta Q = Q_{ebb} - Q_{flood} = \int_{ebb} Q dt - \int_{flood} Q dt \quad (3)$$

$$C = \frac{Q_{ebb}}{Q_{flood}} \quad (4)$$

2-5. 粒子追跡

ΔQ および C を統計処理し、流下能力が上位のケースおよび、各断面パラメータで最大の流下能力を示したケースを抽出し、Lagrange 粒子の放流計算を実施した。粒子挙動の統計指標として、平均的な冲向き変位 $D_{mean,off}$ 、および沿岸方向変位 $D_{mean,along}$ を算出した。粒子の初期配置は 3 パターンを考慮した。パターン 1 では粒子を作滞工内部に配置し、潮汐変動後に保持した粒子数の割合 R_{stay} を算出した。これにより、捕捉した粒子が潮汐変動で滞筋外に流出しないための断面諸量を検討する。パターン 2 では計算領域内に均等に粒子を配置し、全体的な輸送パターンを評価した。パターン 3 については作滞工内に捕捉した粒子数の割合 $R_{collect}$ を算出し、作滞工近傍の粒子が集積される効果を評価した。

（実験調査によって得られた新しい知見）

3. 結果と考察

3-1. 作滞工の形状パラメータの依存性

代表ケースの粒子追跡計算の結果を表 2 に示す。なお、本モデルでは波の影響を考慮していないことから、ストークスドリフトによる質量輸送が生じず、作滞工無しのケース (ケース 8, 9) では粒子軌道がほとんど閉じていることに注意されたい。

表 2. 粒子解析の結果 (全 98 ケース中, 代表的なものを抽出した)

#	ケース	R_{stay}	$R_{collect}$	$D_{mean,off}$ [m]	$D_{mean,along}$ [m]
1	大潮, W20-D2- α 30-S2500	0.83	0.34	6	8
2	大潮, W20-D2- α 30-S1250	0.80	0.33	5	10
3	大潮, W50-D5- α 0-S1000	0.51	0.22	299	316
4	大潮, W50-D5- α 30-S1000	0.72	0.43	13	22
5	小潮, W20-D1- α 0-S2500	0.87	0.26	-4	-4
6	小潮, W50-D2- α 45-S2500	0.76	0.25	8	4
7	小潮, W20-D5- α 45-S1000	0.89	0.14	10	10
8	大潮, 作濬工無し			0	0
9	小潮, 作濬工無し			0	0

3-2. 粒子集積の傾向

大潮条件では, $W = 20\text{m}$, $D = 2\text{m}$, $\alpha = 30^\circ$ のケース (ケース 1) や $W = 50\text{m}$, $D = 5\text{m}$, $\alpha = 30^\circ$ のケース (ケース 4) が大きな集積効果を示した. ケース 1 とケース 2 を比較すると, 同じ潮汐・断面条件において, S の効果は小さいことが分かった. 図 3 にケース 1 の粒子追跡計算の結果を示す. パターン 3 では, 作濬工周辺に配置された粒子の最終位置が作濬工方向に 10m 程度近づいていることが分かる.

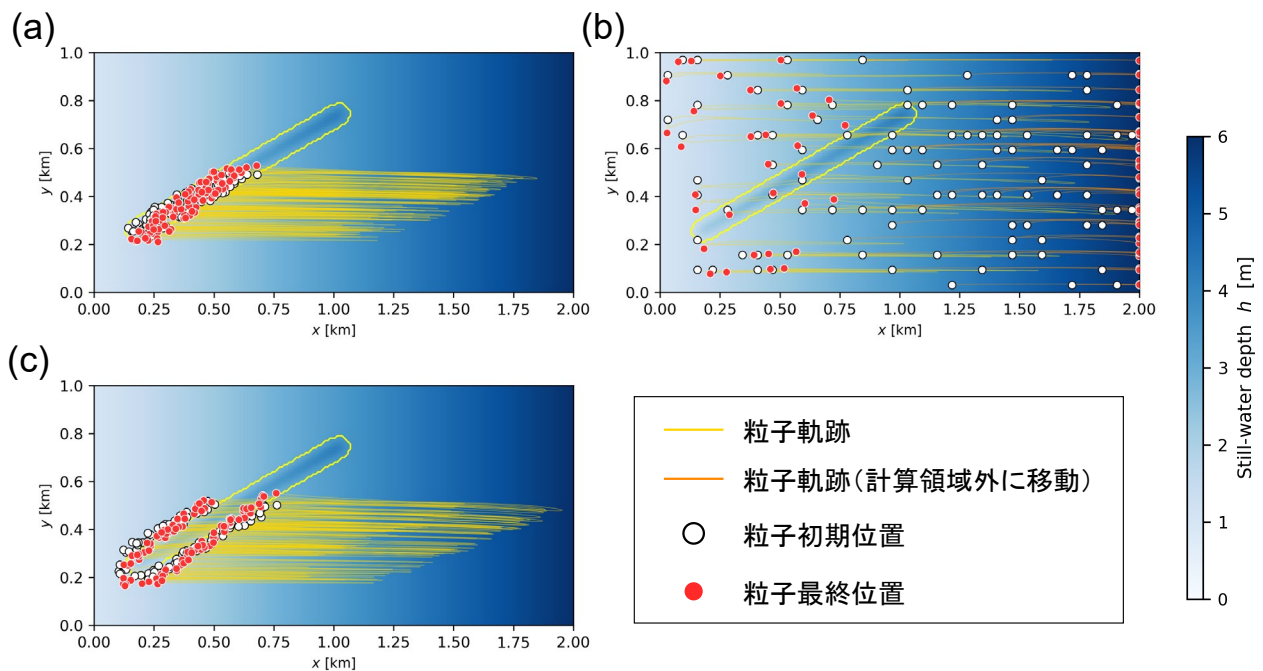


図 3. ケース 1 の粒子追跡の結果. (a)粒子分布パターン 1, (b)粒子分布パターン 2, (c)粒子分布パターン 3.

3-3. 粒子輸送の傾向

ケース 3 は作濬工の断面が大型で, 濬筋勾配も大きく, かつ潮流に平行の配置のため, 輸送力 (ΔQ や C) が最大の組み合わせである. 実際に粒子の移動量は岸沖方向・沿岸方向共に大きいことが分かった. 図 4 にケース 3 の粒子追跡計算の結果を示す. パターン 1 では, 岸側に配置された粒子が濬筋に沿って 400m 程度移動するものもある. これは引き潮モードで濬筋内の流れの重力流下 (図 1 のモード iii) が顕在化した例である. このケースは, 作濬工断面と期待される流下量の関係を示す指標となる. 一方, 保持率 R_{stay} は低めの傾向にあり, ケース X と比較すれば, 粒子を作濬工内に保

持するには、断面形状による流下能力の確保の効果は限定的で、潮流に対して角度をつけること（方向角 $\alpha \neq 0$ ）が有効であることが示唆される。

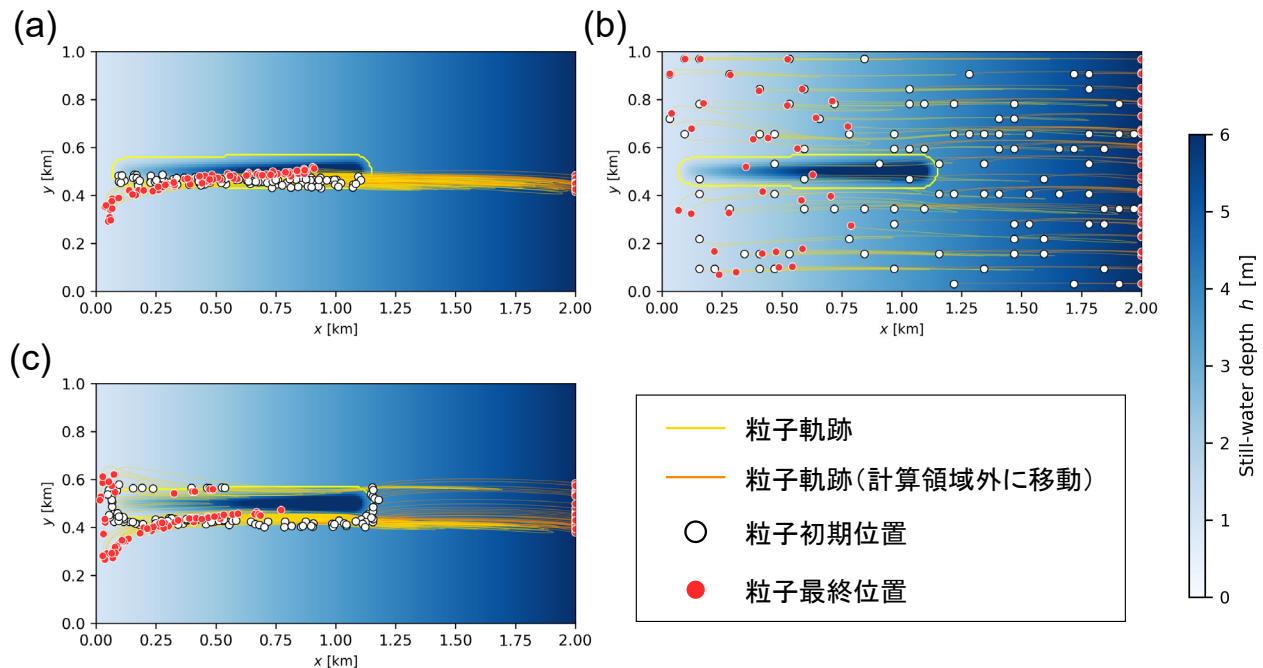


図 4. ケース 3 の粒子追跡の結果. (a)粒子分布パターン 1, (b)粒子分布パターン 2, (c)粒子分布パターン 3.

3-4. 小潮条件における誘導効果

小潮条件では最も岸側の領域を除いて干出が生じないケースである。ケース 5 は輸送力が最も低いと予想されるケースで、実際に正味岸向きの輸送が確認された。断面形状と配置角度の考慮なしには、起潮力の小さな場合は効果がないことが分かった。

3-5. 方向角の影響

表 3 に示した以外の全てのケースをみると、 $\alpha = 30^\circ$ で $R_{collect}$ が最大となった。方向角 α のとき、潮流に対して作濤工が掃く領域は $1/\cos \alpha$ 倍であり粒子の捕捉率（最終的に作濤工から流出するものも含めて一時的にでも作濤工に捕捉された粒子の割合）は概ねこれに合致することが分かった。このため、少なくとも本研究の枠組みでは、方向角を持つ作濤工内の流れは、潮流方向から射影されたものと単純化できる可能性が示唆される。これは潮流に合わせて曲線的な作濤工を設計する場合の簡易的な見積もりとして有効であると考えられる。

一方、作濤工の根本的な概念として、底泥粒子の補足と流下は共存しなければならず、方向角の選択は、二つのバランスの上で成り立つ。方向角が大きいと、より広域の粒子を掃き集めるが、流下能力が乏しく、満ち潮時に作濤工から流出してしまう。この最適なバランスが $\alpha = 30^\circ$ であり、 $\alpha = 15^\circ$ では、集積能力が不足していると解釈できる。

3-6. 断面形状の影響

表 1 に示した以外の全ケースの解析を通して、小断面の濤筋（たとえば、 $W = 20\text{m}$ 、 $D = 2\text{m}$ ）は流れの集中による粒子の集積効率が高いが沖方向輸送力が小さい。一方、大断面（たとえば、 $W = 50\text{m}$ 、 $D = 5\text{m}$ ）では沖方向輸送力は大きい、集積能力がやや低くなる。これを踏まえると、岸側で小断面の作濤工を配置して底泥粒子を集積し、大断面の作濤工で沖向きに輸送するという樹形配置が有効であることが示唆される。

3-7. 集積効果の範囲

$D_{mean,off}$ および $D_{mean,along}$ の統計分布から、作濤工の中心線方向の輸送が生じる有効領域は、中心線から片側2-3 W 程度であることが分かった。効率的な底泥集積のためには最大でも200-300m間隔で作濤工を配置する必要がある。

3-8. 現地調査について

開発した数値モデルについて、通常モードの時のモデルの妥当性及び干潟域の地形計測を目的として、八代海及び有明海の熊本港周辺で現地調査を実施した。しかしながら、2025年8月の豪雨による出水の影響や度重なる測量機材の故障等が影響し、まとまった結果が得られなかった。本報告では、現時点での問題点と更なる研究課題として申し送ることとした。

なお、同じ熊本県有明海海域でも、熊本港周辺(白川水系)と八代港周辺(球磨川水系)では底泥堆積の傾向が異なるという見解がある。3-5で議論した方向角に着目すれば、まっすぐに海に接続する白川と、やや角度をもって接続する球磨川で堆積挙動が異なることが説明できる可能性がある。両港とも底泥堆積の問題は深刻であるが、浚渫処理がより逼迫しているのは熊本港の方であり、 $\alpha=0^\circ$ のケースのように、潮流による底泥の集積効果が限定的であると示唆される。

4. 結論と今後の展望

本研究では、作濤工による底泥輸送ポテンシャルを評価するために二次元浅水流方程式をベースにした海洋流動モデルを開発し、理想化傾斜地形上でのパラメトリック検証および粒子追跡を実施した。得られた知見は以下の通りである。

- 潮汐変動による流下モードの遷移を表現するために運動量フラックスを制限する物理量 ϕ を全水深 H の連続関数として提案し、その検証を行った。
- 小断面は粒子の集積に有利で、大断面は流下に有利であることが定量的に分かった。これらの二つの効果の一つの作濤工で最適化する場合、潮流方向に対して方向角 30° で設計すると効果的である。また、方向角の効果は方向角の射影として単純化できる。
- 実用上は小断面と大断面の樹形配置で設計することが好ましい。また、効率的な底泥集積のためには、濤筋幅 W の4-6倍程度の間隔で作濤工を設ける必要がある。

本研究はパイロット段階の数値モデル開発とその考察であり、いくつかのlimitationが存在する。まず、本研究で用いた格子解像度10mは作濤工を改造するにはやや不十分で、精度検証としての知見は限定的である。また、物理モデリングの視点では、底泥の特性を考慮せず、独立したLagrange粒子の挙動を検討した点に注意されたい。特に、緩く堆積した堆積底泥が安定化せずに流動化するメカニズムや条件については、土質実験を通じた検討が必要であると考えられる。

(発表論文)

- 稲垣直人: 作濤工を用いた潮流による底泥誘導の可能性, 第51回海洋開発シンポジウム, 2026.7(発表予定)
- 国際学術雑誌への投稿を準備中