西湘海岸から海底谷への土砂流出機構の解析

宇多 高明¹・五十嵐 竜行²・立石 賢吾³・繁原 俊弘³・芹沢 真澄⁴・
宮原 志帆⁵

¹正会員 (一財) 土木研究センターなぎさ総合研究所長兼日本大学客員教授理工学部海洋建築工学科
(〒110-0016 東京都台東区台東 1-6-4)

E-mail: uda@pwrc.or.jp

²正会員 (一財) 土木研究センター河川・海岸研究部 (〒110-0016 東京都台東区台東1-6-4)

E-mail: kenkyu1@pwrc.or.jp

³三洋テクノマリン(株) (〒103-0012 東京都中央区日本橋堀留町1-3-17)

⁴正会員 海岸研究室(有) (〒160-0011 東京都新宿区若葉1-22 ローヤル若葉301)

⁵海岸研究室(有) (〒160-0011 東京都新宿区若葉1-22 ローヤル若葉301)

既往研究によれば、森戸川河口に隣接する西湘PA沖の-100 m付近には海底谷谷頭部を縁取るほぼ垂直に切り立った崖があり、また、森戸川河口沖の海底谷の西端と東端の急斜面上には海底谷へと続く流跡模様が残り、その状況から海底面を土砂が滑り落ち、海底を侵食しつつ流れ下っていると推定された。しかしこれらと海岸から深海への土砂落ち込みとの因果関係は明らかでなかった。本研究では、BGモデルを用いた数値計算により、海底谷谷頭部では急勾配斜面を経た沖合への土砂落ち込みが起り得ることを示した。

Key Words : submarine canyon, Seisho coast, topographic changes, BG model

1. はじめに

西湘海岸の酒匂川から森戸川河口間では、海底勾配が急で海岸線近くまで海底谷が迫っている。この付近の海岸では、酒匂川起源の土砂が東向きの沿岸漂砂により運ばれてきているが、流出土砂量の減少とともに海底谷への土砂流出¹⁾があるため、徐々に侵食が進んできた。このため、西湘海岸の海浜変形に関する検討では、汀線付近のみならず海底谷周辺の地形変化も含めた解析が必要である。これに関する既往研究として、宇多ら²⁾は、森戸川河口沖海底谷の谷頭周辺を含んで国府津海岸の海浜変形について調べ、それに基づき海底谷への土砂落ち込み機構をBGモデルを用いて検討した。その結果、森戸川河口付近を境として海岸線の向きが15°変わり、河口西側の海岸線の方向角が大きいため河口付近で沿岸漂砂量が急減して堆積が起こるが、ちょうどその付近に海底谷が発達しているため深海への土砂落ち込みが生じやすいとした。この研究では海底地形をモデル化したため、現地海岸での海底谷を経た深海への土砂流出の経路などについては不明であった。このことから、藤井ら³⁾は、2014年8月森戸川河口沖の海底谷を含む西湘海岸全体(酒匂川～大磯港間の約13 km区間)を対象としてNarrow Multi-Beam (NMB) 測量を行い、この測量結果を

基に森戸川河口沖の海底谷周辺区域の海底地形特性を詳しく調べた。この結果、西湘PA沖の-100 m付近の海底面に、海底谷谷頭部を縁取るほぼ垂直に切り立った崖があること、また森戸川河口沖の海底谷の西端と東端の急斜面上には海底谷へと続く流跡模様が判読され、その状況から海底面を土砂が滑り落ち、海底を侵食しつつ流れ下った跡が残されたと推定した。しかしこれらと海岸から深海への土砂落ち込みとの物理的因果関係は明らかでなかった。本研究では、既往データを基に海岸から深海への土砂流出機構をBGモデルを用いた数値計算により検討した。

2. 既往研究の結果

藤井ら³⁾は、2014年にNMB測量を行い、森戸川河口沖の海底谷周辺区域の海底形状を詳しく調べた。図-1にはこの区域の深浅図を示す。この区域の沖合には深い海底谷が発達している。宇多ら²⁾による計算によれば、この海底谷では東向きに流れてきた沿岸漂砂の落ち込みの可能性が高いことが示されている。また、2007年の台風9号時には通常と逆向きの西向きの沿岸漂砂が起こり、二宮海岸付近から西向きに移動した砂礫もこの海底谷に落ち込んだと推定されている⁴⁾。図-1でとくに注目される

図-1 森戸川河口沖の海底谷発達区域4の深浅図³⁾

図-2 西湘PA沖の海底を切る測線a-a', b-b', c-c'の縦断形³⁾

のは、西湘PA沖の-100 m付近の海底面にほぼ垂直に切り立った崖があることである。図-2は図-1に示したa-a', b-b', c-c'の断面形状を示す。これらは当地域に発達した

(a) 森戸川河口沖の海底谷の鳥瞰図 (遠景)

(b) 森戸川河口沖の海底谷の鳥瞰図 (近景)

図-3 森戸川河口沖の海底谷の鳥瞰図³⁾

海底谷の西端，中央，東端に形成されており，いずれも深海へと続く海底谷の谷頭部を縁取る．a-a'断面では急崖の傾斜角は 66° で，-67～-90 m間に形成された標高差23 mの急崖である．この急崖の上部は1/4の急斜面であるが，急崖の下部には幅15 mの平坦面が続いた後，1/3勾配の斜面となる．b-b'断面では急崖の上部下部の海底勾配はともに1/3であるが，急崖の傾斜角は 77° といっそう急である．この断面での急崖は-77～-99 m間に発達しているが，この急崖の上部にも小規模な崖がある．急崖の始まる水深は-67 mと，a-a'断面と同様である．c-c'断面では急崖は-59～-105 m間に発達し，急崖の傾斜角は 74° である．しかし他の2断面と比べて縦断形が丸みを帯びており，土砂移動により海底面が均された特徴を示すのが特徴である．以上の3断面の急崖では崖の上部，下部ともに1/3ないし1/4の急勾配が続いている．

森戸川河口沖に発達している海底谷についてNMB測量データより作成された鳥瞰図を図-3に示す．海底谷を挟んで西側には陸棚が広がっているが，図-3(a)に示すC, D, Eには垂直に近い急斜面がある．一方，海底谷を挟んで東側には平坦な広い尾根状の膨らみがあり，海底谷を挟んで海底地形が東西非対称で，西側では急峻，東側では緩勾配の海底面となっている．図-3(b)に示す森戸川沖海底谷の近景では，海岸線と平行に細長い棚状地形があり，その海側端は-20 mであって，そこからは急傾斜で深くなる．注目されるのは，海底谷の西側谷頭ではFのように，一方東側谷頭ではGのように海底谷へと続く

流跡模様が判読され、その状況から海底面を土砂が滑り落ち、海底を侵食しつつ流れ下ったように見えることである。そしてF、Gそれぞれが海底谷への西端と東端に位置することから、Fは酒匂川方面からの東向き漂砂が、Gは2007年の台風9号時のように東寄りの入射波条件での西向き漂砂が海浜から深海へと落ち込んだ際、海底面に刻印された模様と推定された。

3. 1号突堤と西湘PAに挟まれた区域での地形変化

2016年7月には藤井ら³⁾が解析した区域2で再びNMB測量が行われた。図-4には、区域2の深浅図と2014~2016年の地形変化量を示す。この区域では、3号突堤の西側の汀線は直線状に伸び、また1、2号突堤の東西で汀線位置に違いが見られないことから、現況において1、2号堤では沿岸漂砂が自由に通過可能な状態になっていると考えられる。これに対し3号突堤では、東西の汀線位置に60 mの差ができており、東側の汀線が後退していることが分かる。これを考慮した上で、図-4より地形変化の特徴を調べると、図-4(c)では2号突堤の東側から3号突堤までのほぼ-10 m以浅で堆砂が起きており、しかも-5 m以浅に集中的な堆砂域が形成され、それが3号突堤の先端を東側へ回り込んでいる。これに対して2号突堤より西側での地形変化は小さい。以上より、東向き沿岸漂砂が3号突堤により阻止され、その一部が東側へと回り込みつつあると推定できる。このとき図-4に示す3号突堤の西側40 mを通る測線T4での縦断形変化は図-5のようであり、陸域の+2 mから-10 mまでの間で堆積が起き、汀線が11 m前進したことが分かる。この縦断形変化より、T4付近での波による地形変化の限界水深 h_c はほぼ-10 mにあることが分かる。図-4に示したように顕著な堆積が見られた区域をA4とすると、区域A4での堆積量は29,386 m^3 であった。また、区域A4では3号突堤の先端で一部漂砂の回り込みが見られるもののその量は大きくなく、またこの地域での堆積土砂は酒匂川方面から運ばれてくるので、上記土砂量変化を2年で除すと $1.47 \times 10^4 m^3/yr$ の沿岸漂砂が酒匂川河口方面から流入したこととなる。

4. BGモデルによる深海への土砂流出の計算

(1) 計算方法

図-6に示すように、酒匂川河口から森戸川河口を計算対象としてBGモデル（Bagnold概念に基づく3次元海浜変形予測モデル）⁹⁾を用いた計算を行った。酒匂川河口左岸から森戸川河口付近に至る、沿岸方向に3.8 km、岸沖方向に2 kmの矩形区域を計算対象とした。この区域のうち、酒匂川河口部を除く他の地域では、波による地形変

図-4 1号突堤と西湘PAに挟まれた区域2での地形変化

図-5 3号突堤の西側40mを通る測線T4での縦断形変化

化の限界水深 h_c はほぼ-10 mにあり、それ以深では波による地形変化は見られなかった。そこで計算では2014年測量の海底地形を固定床と見なし、そこに計算領域西端の酒匂川河口左岸から2万 m^3/yr の土砂を流入させ、その移動状況を追跡するという方法を用いた。3.で述べたように、3号突堤付近で堆砂が起り、上記期間での堆積量が $1.47 \times 10^4 m^3$ であったことから丸めて2万 m^3/yr とした。土砂は、酒匂川河口左岸の $X = 3.5 \sim 3.8$ km区間の3~10 mの水深帯から湧き出し方式で与えた。土砂移動状況の追跡期間は50年とし、その間での土砂移動と深海への土砂流出状況について調べた。

計算に用いた波浪は、平塚観測所での1988~2008年の観測データ¹⁾によるエネルギー平均波（波高 $H = 0.84$ m,

図-6 波浪場の計算領域

図-7 波浪場（屈折係数と波向）

$T=6.3$ s) とした。また波向はtrial & errorにより $S4^{\circ}E$ (-30°) とした。波浪場はエネルギー平衡方程式⁶⁾により算定した。当地域では図-6に示すように酒匂川の河口デルタが沖向きに突出しており、その影響が周辺部に及ぶ可能性があるため、波浪場の計算では河口部を包括するように計算領域を設定した。砂の平衡勾配は $\tan\beta_c = 1/10$ 、砂が沖合の急斜面を滑り落ちる際の限界勾配は $\tan\beta_g = 1/5$ 、バーム高は $h_R = 3$ m、 h_c は10 mとし、計算領域は $\Delta x = \Delta y = 20$ m間隔で分割し、 $\Delta t = 5$ hとして差分法により解いた。なお、ここで新たに定義した限界勾配は、静水面下で土砂が安定的に堆積する際の安息勾配（ほぼ1/2）より緩やかな勾配であって、 h_c より深いものの波の往復運動を受ける領域において、砂が急斜面を滑り落ちる際の限界勾配を意味し、この値よりも急勾配の斜面上では波による往復運動時に重力作用により砂は急斜面上に留まることができず、深海へと落ち込む。図-2に示した3断面では、水深が50 m以上と十分大きく、波の作用を受けないと考えられる水深帯において、急崖およびその上部・下部に勾配1/3～1/4の急斜面が存在している。そしてこの急斜面自体はほぼ安定的に保たれつつ、急斜面を経た砂の落ち込みが起きていると推定される。これより、上記勾配を上限値として、海底勾配がそれより緩やかなある値を満足する条件では、重力効果により沖向きの砂移動が起こると考えられる。本研究では、この勾配を限界勾配 $\tan\beta_g$ と呼ぶ。表-1には計算条件をまとめて示す。

表-1 計算条件

計算対象	酒匂川～森戸川河口
地形変化計算	BGモデル ⁵⁾ : 酒匂川河口左岸～森戸海底谷: 沿岸方向 3.8 km×岸沖方向 2.0 km
波浪変形計算	エネルギー平衡方程式 ⁶⁾
初期地形	NMB 測量による 2014 年 8 月の海底地形 (固定床)
入射波条件	エネルギー平均波: 波高 $H = 0.84$ m, $T = 6.3$ s (平塚観測所: 1988～2008 年の観測データ ¹⁾), 波向 $S4^{\circ}E$ (-30°)
平衡勾配と限界勾配	$\tan\beta_c = 1/10$, $\tan\beta_g = 1/5$
バーム高	$h_R = 3$ m
波による地形変化の 限界水深	$h_c = 10$ m
漂砂量係数	沿岸漂砂量係数 $K_y = 0.016$, 小笹・Brampton 項の漂砂量係数 $K_2 = 1.62K_y$, 岸沖漂砂量係数 $K_s = K_y$
漂砂の水深方向分布	一様分布
境界条件	右端: $Q_m = 2$ 万 m^3/yr , 左端: 通過境界 岸沖端: $q = 0$ (漂砂の流入流出なし)
計算メッシュ	$\Delta x = \Delta y = 20$ m
計算時間間隔	$\Delta t = 5$ h
計算期間	50 年
波浪場の計算	エネルギー平衡方程式 ⁶⁾ 入射波方向スペクトル: プレドシュナイダー・光 易型周波数スペクトルと光易型方向関数を組み 合わせたもの, 方向集中度 $S_{max} = 25$, 周波数分割数 $N_F = 3$, 方向分割数 $N_\theta = 16$
備考	土砂供給: $Q_m = 2$ 万 m^3/yr , 湧き出し方式, 土砂供給範囲: $X = 3.5 \sim 3.8$ km 区間の 3～10 m の 水深帯 (酒匂川河口左岸)

(2) 計算結果

図-7には波浪場を示す。波が南から入射するが、酒匂川から森戸川河口に至る区域では海岸線に対して右回りの方向からの入射となるため東向きの沿岸漂砂が生じる。

図-8には初期地形と50年後の海底地形を示す。流入土砂量が2万 m^3/yr と小さいために、これらの比較のみでは明瞭な地形変化は起きていないように見える。しかし酒匂川河口左岸側では緩やかに汙線が前進している。図-9には10年間隔で50年後までの初期からの地形変化量の分布を示す。時間経過とともに-10 m付近にある陸棚に沿って堆積域が酒匂川河口部から東側へと広がりを見せるが、一連の堆積量の変化を見ると、森戸川河口沖の海底谷の-220 m以深では堆積量が増加している。同様に、図-3に示した海底の急崖C、E沖でも深海への土砂落ち込みが起きている。50年後の地形変化量図には深海への土砂落ち込みが起きている場所を矢印で示す。これらの位置は、海底に急峻な崖がある位置と森戸川河口沖の海底谷谷頭の西側側面であり、海底面に流跡が発見された場所と重なりを示す。

図-10には50年後の漂砂フラックスの分布を示す。深海への土砂落ち込みが起きている場所はいずれも海底谷谷頭が海岸線近傍まで迫り、海底勾配が急となっている場所と一致している。図-11には図-9(e)に示す2領域での堆積土砂量の経年変化を示す。ここに領域設定では、図-3に示したようにC、Dの急崖の沖に伸びる海底谷は森戸川河口沖の海底谷と独立に伸びているが、Eでは-200 m付近で森戸川河口沖の海底谷と繋がっており、したがって海底谷内の堆積土砂は森戸川河口沖から落ち込んだ

図-8 初期地形と50年後の予測地形

土砂とEを経て落ち込んだものとの和となることから、これらを含んで領域2を設定した。図-11によれば、全域での落ち込み土砂量は総流入量の約25%の26.2 万 m^3 であるが、寄与度が高いのは領域2の0.70で、それに領域1の0.30が続いている。また、図-12には沿岸漂砂量の沿岸方向分布と、流入漂砂量との比として定めた沿岸漂砂量比を示す。東向きに流れてきた沿岸漂砂は、上記海底谷への損失しつつ東向きに運ばれるため、森戸川河口ではほぼ1/4まで漂砂量が減少していることが分かる。

5. まとめ

本研究での計算結果によれば、図-2, 3に示した海底の急崖のうちC, Eはstaticに存在しているのではなく、岸側から陸棚上を通過して深海へと向かう砂移動が起きている斜面の下に続いていることから、dynamicな変動を受けつつ存在している崖と考えられる。急崖の陸側から汀線に至る区域では、図-1に示したように、当海岸での h_c (ほぼ10 m)³⁾のごく近傍まで凹状の急勾配斜面が続いている。よってこれらの凹部を通過して海底谷へと落ち込む漂砂が起り得る条件にあり、いわばactiveな海底谷となっていると考えられる。本研究では、酒匂川河口方面からの沿岸漂砂量を2万 m^3/yr と与えたが、この量が大きければ海底谷への落ち込み量が増す。また、砂の限界勾配 $\tan\beta_g$ を1/5と与えたが、この勾配は、流体流動を受けない領域において土砂が堆積する場合の安息勾配1/2より緩い。計算では砂が沖合の急斜面を滑り落ちる

図-9 50年後までの水深変化量

図-10 漂砂フラックスの分布

図-11 海底谷内の堆積土砂量の変化

際の限界勾配を1/5 と与えた場合に海底谷への土砂落ち込みが起こるとの結果を得たが、限界勾配の設定法についてはさらに検討を要する。

謝辞：本研究に際しては関東地方整備局京浜河川事務所より業務の一環として得られた成果の一部を許可を得て発表させていただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 竹内勇一, 渡辺政雄, 畑澤 俊, 中西勇人, 宇多高明, 石川仁憲, 古池 鋼, 野志保仁: 海底谷が近接する小田原国府津海岸における越波対策の検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, pp.I_716-I_720, 2012.
- 2) 宇多高明, 高尾治海, 秋田和枝, 芹沢真澄, 三波俊

図-12 沿岸漂砂量と沿岸漂砂量比の沿岸方向分布

郎, 石川仁憲, 横澤 綾: 海底谷への土砂落ち込みの予測モデル, 海岸工学論文集, 第 56 巻, pp.626-630, 2009.

- 3) 藤井政人, 伊藤一十三, 鈴木建也, 宇多高明, 五十嵐竜行, 五味久昭, 立石賢吾, 繁原俊弘: 西湘海岸沖海底谷周辺での NMB 観測データの解析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.72, No.2, pp.I_793-I_798, 2016.
- 4) 宇多高明, 丸山将吾, 高野弘之, 芹沢真澄, 三波俊郎, 石川仁憲, 宮原志帆: T0709 号時の高波浪による西湘海岸の急変形の再現計算, 海岸工学論文集, 第 56 巻, pp.561-565, 2009.
- 5) 芹沢真澄, 宇多高明, 三波俊郎, 古池 鋼: Bagnold 概念に基づく海浜変形モデル, 土木学会論文集 B, Vol.62, No.4, pp.330-347, 2006.
- 6) 間瀬 肇, 高山知司, 国富将嗣, 三島豊秋: 波の回折を考慮した多方向不規則波の変形計算モデルに関する研究, 土木学会論文集, 628/ II 48, pp.177-187, 1999.

(2017.3.15 受付)

INVESTIGATION OF SEDIMENT DISCHARGE INTO SUBMARINE CANYON OFFSHORE OF SEISHO COAST

Takaaki UDA, Tatsuyuki IGARASHI, Kengo TATEISHI, Toshihiro SHIGEHARA, Masumi SERIZAWA and Shiho MIYAHARA

Owing to the previous studies on bathymetric features around the submarine canyons using the NMB survey data, it was found that three vertical submarine canyons develop near the head at a depth of around 100 m offshore of Seisho PA next to the Morito River mouth. Traces were left on the seabed on a steep slope at the east and west ends of the submarine canyon offshore of the Morito River mouth, from which sand discharges into the deep ocean. The formation of such topographic changes and offshore discharge of sand into a deep ocean have not yet been clarified. In this study, the BG model was used to predict such topographic changes. The possibility of offshore discharge of sand into the deep sea via a submarine canyon was shown by the numerical simulation.