海域の土砂移動を知る*

Estimation of Coastal Sediment Transport

武 若 聡**
TAKEWAKA Satoshi

Abstract Coastal erosion is a severe problem elsewhere along the Japanese island, and efforts have been paid to cope the situation. For sophisticated management of coastal erosion, we must understand the spatial and temporal distribution of sediment fluxes, however, this item is usually very difficult to observe directly. The alternative way to estimate this item is measurement of bottom topographies, and then assess the sediment flux indirectly using the continuity equation between temporal change of bottom elevation and divergence of sediment flux. In this article, estimation of coastal sediment transport in the field is discussed, and then an attempt to estimate the sediment motion at the river mouth is introduced.

Keywords: Coastal sediment, Sediment flux, Topography, Field measurement

1. はじめに

日本の海岸の多くは海岸侵食に悩まされており、関係者の尽力により、辛うじて現在の水際位置（汀線）を維持している海岸が多い。海岸侵食に対応するには、海岸地形変動に関する理解と海岸地形変動を制する技術が必要であり、これらに関連する事象の分析、技術開発等は土木工学の一つの分野である海岸工学で行われており、ここでは、波浪、流れ、漂砂、海岸構造物等が研究対象である（例えば [1, 2]）。

筆者は海岸地形変動に関する研究に興味を持っており、その成果を海岸侵食対策に活用することを目指している。ここでは、先ず、海岸地形の変動と土砂フラックスの関係、これらの観測方法、海岸侵食対策について述べ、続いて、河川から海岸に運ばれる土砂量を推定するための観測事例を紹介する。最近になり、海岸地形を計測する技術は急速に進展しているが、土砂フラックスを測定あるいは推定する技術に関する研究の余地は未だ大きいと筆者は感じている。

2. 海岸地形と土砂移動

2.1 海岸地形変動と土砂フラックスの関係

海岸地形を知るとは、陸上から海中にかけての地盤高 h の時空間分布 $h(x, y, t)$ を知ることである。ここで x, y は平面位置を表わす座標、 t は時間である。海岸地形は波が海岸に打ち寄せる際に、また、潮汐・海流・海浜流等により時々刻々変化しており、これを全て追跡することは困難である。

海岸侵食対策を考える上で重要となるのは、海岸地形が大きく変動する台風、冬季の暴浪等の荒天前後の変化（短期間）、年間に生じる季節的な変化（中期間）、数年から数十年にわたる変化トレンド（長期間）である。これらを把握するために、測量（深淺測量、汀線測量）が行われており、また、リモートセンシング手法により高頻度・高密度に地形データを取得する研究も精力的に行われている。

海岸地形の変動は土砂の移動、すなわち、土砂フラックスによりもたらされる。土砂フラックスは単位時間当たりに検査面を通過する土砂量（体

* 2019.5.14 受付

** 筑波大学システム情報系 〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

TEL: (029) 853-5361 E-mail: takewaka@kz.tsukuba.ac.jp

積)である。 x 方向、 y 方向の土砂フラックス (単位幅、単位時間当たり) を Q_x 、 Q_y とすると、地盤高の時間変化と土砂フラックスの収束・発散の間には次の土砂の連続式が成立する。(例えば [3])

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

土砂フラックス、すなわち土砂の移動は、波、流れ (海流、潮流、海浜流) などによりもたらされる。これらの外力が大きくなる荒天時に活発になり、これに伴い地形の変動も大きくなる。

様々な外力と土砂フラックスの関連を調べる解析的、実験、フィールド観測による研究は数多く行われており、一定の成果は蓄積されている。しかしながら、現象が相当に複雑なため、あらゆる場面について土砂フラックス (向きと大きさ) を予測する方法は確立されておらず、いまだ経験的な面が多く残されている。海域では、土砂はあらゆる方向に移動できるので、移動方向の確実な予測でさえ難しいのが現状である。(例えば [4])

2.2 土砂フラックスと海岸地形の観測

土砂フラックスを直接計測するためには、局所

Fig. 1 Estimation of sediment flux from topography variation close to a rigid wall. Bottom configuration has been changed during high wave event, and sediment influx during this period can be computed from elevation change. q is the averaged sediment flux during the event.

の土砂濃度 c と流速 u を計測し、これらの積 cu を鉛直方向に積算しなければならない。これを精密に行うのは実験室でさえ難しい。海域では、荒天時に観測機器 (流速計、圧力計、濃度計等) を海中、海底に展開して事後にデータを回収するのは非常に困難である。観測機器を海底面に固定できたとしても、土砂移動が活発になり地形変動が生じて地盤面が低下すると機器が流失し、あるいは、逆に砂が設置位置に堆積すると埋没し、荒天後に機器を回収できなくなることがしばしばある。

荒天時の土砂フラックスを推定するための次善の策として行えるのは、海底地形の計測 (測量) である。地盤高のデータを豊富に入手できれば、荒天前後の地盤高変化量を求め (式 (1) の左辺第一項)、何らかの仮定をした上で土砂の連続式 (1) を時間方向、空間方向に積分し、荒天中の土砂フラックス (積算値) を推定することができる。例えば、荒天前後の詳細な海底地形データが入手でき、また、防波堤等の土砂が通過できない不透過境界を設定できる場合、この近傍の土砂フラックスの時間積算値を見積もることができる (Fig. 1)。

一方、海底地形のデータを豊富に収集できたとしても、土砂フラックスを推定できない場合がある (Fig. 2)。土砂が移動した結果が地盤高の変化として現れない場合、連続式 (1) を介して土砂フラックスを推定することはできない。

以上のように、海域の土砂フラックスを推定することは簡単でなく、現在でも様々なアイデアによりこれを推定する研究が行われている。

2.3 海岸侵食対策と土砂フラックスの推定

砂浜海岸の多くは、河川より出水時に土砂が河

Fig. 2 Sediment flux without bottom variation.

Fig. 3 Schematic explanation of coastal erosion propagation. (a) Erosion: shoreline retreats by imbalance of sediment flux. (b) Countermeasure: breakwater is set to keep sand at eroded area. Sand accumulates behind the breakwater, however, sediment flux is interrupted and new eroded area appears in the vicinity.

口域に供給され、これが波の作用により沿岸に運ばれる、という一連のプロセスにより形成されたと考える。この場合、砂浜にある砂は常に入れ替わっており、海岸工学の分野ではこれを、土砂が絶え間なく動き、海浜が動的に維持される「動的平衡状態」と呼んでいる (Fig. 2 に説明したような状況)。ここで、河川からの土砂供給が減少する (例えば、ダムを設置)、沿岸での土砂の動きが妨げられる (例えば、港の建設) 等の人為的な影響があると、土砂の連続的な供給が遮断され海岸侵食が生じる。海域では、土砂供給が絶たれても引き続き波は作用するので、砂は局所的に失われ、陸域と海域の境界である汀線位置が陸側に後退する。

海岸侵食対策としては、長らく、局所的に土砂を留めて汀線位置を維持する「ストック管理」により砂浜を「静的平衡状態」に維持することが行われてきた。ところが、対策工 (海岸構造物: 護岸、突堤、離岸堤など) が土砂移動の連続性をさらに妨げ、侵食域が拡大する事例がしばしば見られる (Fig. 3)。構造物の背後には砂が堆積し、汀線の位置を確保できるものの、土砂フラックスを遮断するため隣接域に新たな侵食域が発生する。フィールドでは、これは数年の時間ラグを経て顕在化することが多い。

以上の反省として、流域における土砂移動 (流砂) と海域の土砂移動 (漂砂) の連続性を確保しながら、海岸に供給される土砂量を確保して侵食対策を行うフラックス管理へのパラダイムシフトが提唱され、関係者の間で共有されつつある。

フラックス管理の実現には、流域から海域への土砂供給促進方法、土砂フラックスを制御可能な構造物の開発、高精度・高分解能に土砂フラックスの時空間分布を観測する技術、観測結果の地形予測モデルへの反映方法など、様々な要素技術が必要であり、それぞれについて研究開発が進められている。

フラックス管理が完成した暁には、土砂フラックスの時空間分布が常に把握され、例えば、侵食域が拡大する前の予防的な対策の実施、侵食が生じた際に砂浜が自然のプロセスで回復する可能性の診断等が可能になると考えられる。

以上に必要となる土砂フラックス把握の分解能は、時間的には台風、冬季の暴浪等の荒天前後の変化 (短期間)、年間に生じる季節的な変化 (中期間)、数年から数十年にわたる変化トレンド (長期間) であり、空間的には海岸構造物のスケール (オーダー: 百メートル) となる。また、多くの土木事業が単年度の予算で実施されることを考えると、土砂フラックスの推定・把握は即時的に行えることが望ましい。ただし、残念ながら、前節に説明したように、土砂フラックスの評価は難しいのが現状であり、これを打破する手法の提案が望まれる。

3. 河口域における土砂輸送量の推定に向けて

ここでは筆者が行っている天竜川河口の X バンドレーダ観測の紹介をする。天竜川が注ぎ込む遠州灘には侵食で苦慮している海岸地先が多くある。天竜川は、河口より上流約 30 km の地点より沖積地を形成し (天竜川平野、あるいは、遠州平野)、この沿岸部の一部が遠州灘である。この地域の海岸侵食の一つの要因として挙げられるのが、天竜川の土砂供給減少である。この観点より、多くの研究が行われ、近年では総合的に土砂を管理し、流域から海域への土砂供給を増やすためのダム再編事業が行われている。

筆者の行っている観測では、出水時に河川から海域に運ばれる土砂量の推定を目指している。研究の途中ではあるが、現時点の成果を紹介する。

Fig. 4 Observation site at the river mouth of River Tenryu, Shizuoka, Japan. (Left panel) Satellite image of the study area. (Right panel) Time-averaged radar image, coordinate system. Satellite image: Ikonos-2. Acquisition date/time: October 4, 2008, 10:54 JST. Time-averaged radar image: average of images collected from 11:00 JST to 11:17 JST on October 4, 2008.

Fig. 5 Morphological processes during a flood in July 2011. Sequence of time-averaged radar images at different stages of the flood from July 9, 2011, 14 h to July 21, 2011, 14 h is displayed, which show as if the river flow is putting out sediment to the coastal area. The lower portion of each image shows the water level variations measured at the Nakanomachi station in the river, and the Omaezaki tide level station. The white vertical lines in the lower portion denote temporal positions in the radar acquisition. Movie of this sequence is uploaded on YouTube <https://youtu.be/k5ALaVjc-aA>.

3.1 Xバンドレーダによる沿岸域の観測

Xバンドレーダ（マリンレーダ）は船舶に搭載し、周辺の障害物を検知することを目的としている。この機器の本来の用途は船影、岩礁などの航

行の支障となるものをレーダ画像として捉えることで、同時に映る水面からの情報（表面波）は不必要なものである。海岸、海洋に携わる研究者はレーダ観測の副産物として映る波浪に着目し、

Fig. 6 Schematic explanation of imaging mechanism of bright-dark patterns in the time averaged radar images.

研究に応用することを検討してきた。X バンドレーダは個々の波（周期 10 秒のオーダ、波長 数 10 m から 100 m のオーダ）の伝播状況を捉え、数 km の範囲の広範な波浪場の時間的な変動を連続的に捉えることが可能である。

著者はこのレーダを用い、汀線位置の測定、波の伝播解析による海底地形の推定、汀線形状の年間の変化等の海岸地形の観測に関する研究を進めてきた。天竜川における観測もこの一環として行われたものであり、出水時の観測結果より、河川から海域に土砂が供給される過程を紹介する（[7-9]）。

3.2 天竜川河口域における観測

X バンドレーダを天竜川河口右岸にある下水処理施設の屋上に設置した。Fig. 4 に観測サイト、座標系、レーダ画像を時間平均（平均時間：約 17 分）した平均画像、対応する衛星画像などを示す。座標系は東西方向に x 軸、南北方向に y 軸を設定した。平均画像は解析に用いる部分を取り出して表示してある。輝度値の大きい部分が陸域に対応しており、河道内の砂州、河口、河口砂州の水際位置、河川水フロントの発生などの状況を判読できる。河口砂州の海側にある水際位置の一部はレーダ設置位置から見て死角領域となるために映らず、また、下水処理施設内にある塔が妨げとなってレーダエコーを取得できない領域が扇状にある。

3.3 出水時の観測結果

河川上流域で降雨があると河川水位が上昇し、出水が生じる。出水時には流れが早くなり土砂の移動が活発になる。年に数回程度観られる規模の比較的大きな出水があった 3 日間の平均画像を分析すると、あたかも河川から海域に土砂が押し出されるような画像が取得される（Fig. 5）。これは河道にあった底面地形の凹凸（砂堆）が移動したものの反映であると考えている。Fig. 6 に砂堆上でレーダの反射の強弱（輝度パターン）が現れ

るメカニズムを示す。砂堆の背後に剥離渦が形成され、これが離脱して水面に到達すると水面上の乱れが増加してレーダの反射が増すと考えている。この出水時の観測結果（動画）を YouTube に掲載している（<https://youtu.be/k5ALaVjc-aA>）。

以上は、残念ながら土砂フラックスを直接観測したものではない。流れが大きくなり土砂移動が活発になり、その結果として生じた河床地形の時間変動を間接的に観測したものと考えている。式 (1) で言えば第一項のみを捉えたもので、肝心の土砂フラックスは何等かの方法で推定しなければならない。

この輝度パターンの下流方向への移動速さは、出水のピーク時に増加し、また、海域と河川間の水位勾配が大きくなると増加するという特徴がある。複数の出水時に観られた河道内のパターンの移動速さと出水の規模（河川-海域間の水位差）を比較したところ、両者に相関が見られた。これより、輝度パターンの移動速さは土砂移動の活発さを代表する量であり、これの下流方向への移動状況の分析により、河川から海域に向けての土砂移動の推定ができると考えた。

砂堆の出水時の挙動に関する報告によると、砂の移動速さは $0.0001 \sim 0.001$ m/s のオーダにあること、河川流が増すと移動も大きくなることなどが観測結果として紹介されており、これらの特徴はレーダ観測で得られた結果と整合する。これより、レーダ観測結果に観られる輝度パターンの移動は砂堆の移動を捉えたものとした。

河川工学では、砂堆の移動に関する分析が行われている。例えば、河床地形の移動速度と土砂フラックスの関係を求めた研究成果（式 (1) と流砂フラックスを連立させた式系の安定解析）があり、ここに、観測で得られた輝度パターンの移動速さを代入し土砂フラックスを算出した。測量により求めた出水中の土砂フラックスを積算した量を求めたところ、出水により河口域に堆積した土砂量の数割分を説明できた。今後、この方法で河川から河口域に供給される土砂量（= 出水中の土砂フラックスの積算値）をより正確に見積もるためには観測事例を増やし、また、数値計算を援用することが必要と考えている。

4. むすび

本稿では、海岸地形の変動と土砂フラックスの

関係、これらの観測方法、海岸侵食対策について簡単に説明した。続いて、筆者が取得した河川から海岸に運ばれる土砂量を推定するための観測結果を示し、河川から海域への土砂フラックスを推定する試みについて説明した。残念ながら、海域、河口域における土砂フラックスの直接的な測定結果、あるいは、尤もらしい推定結果を示すには至らなかったが、この方面の研究の成果活用の方向性と土砂フラックス推定の難しさを感じ取って頂ければ幸いである。

Nomenclature

h : bottom elevation [m]
 Q_x, Q_x : sediment flux (per unit time and width) [m³/s/m]

参考文献

- [1] Horikawa, K., Coastal Engineering, University of Tokyo Press (1978).
- [2] Goda, Y., Coastal Engineering, Gihodo Shuppan (2012).
- [3] Horikawa, K. (Editor), Nearshore Dynamics and Coastal Processes -Theory, Measurement, and Predictive Models-, University of Tokyo Press

(1988).

- [4] Kuriyama, Y., Beach Deformation, Gihodo Shuppan (2006).
- [5] Takewaka, S., Measurements of Shoreline Positions and Intertidal Foreshore Slopes with X-band Marine Radar System, Coastal Engineering Journal, Vol. 47, 91-107 (2005).
- [6] Hasan, G. M. J. and Takewaka, S., Observation of a Stormy Wave Field with X-band Radar and its Linear Aspect, Coastal Engineering Journal, Vol. 49, 149-171 (2007).
- [7] Takewaka, S., Visibility of River Plume Fronts with an X-band Radar, Journal of Sensors, Article ID 6594847 (2016) (doi:10.1155/2016/6594847).
- [8] Takewaka, S., Observation of Whole Flushing Process of a River Sand Bar by a Flood Using X-Band Radar, Journal of Marine Science and Engineering (2016) (doi:10.3390/jmse4020032).
- [9] Takewaka, S. and Ono, T., X-band Radar Observation of Morphological Changes due to Flood Events at the Mouth of Tenryu River, Japan, Coastal Engineering Journal, Vol. 60, 387-399 (2018) (doi:10.1080/21664250.2018.1529264).