漂砂系内の土砂移動の観測方法に関する研究

Measurements of Longshore and Cross-shore Sediments in a Littoral Cell

武若 聡¹・安 勝鉉²

Satoshi TAKEWAKA and Seunghyun AN

Field observation on spatial and temporal variation of shoreline positions along a 16 km-long sandy beach forming a littoral cell was conducted with four X-band radars in year 2010. Half of the coast is protected by jetties, locally known as Headlands, and the rest is close to natural state exposed to the ocean. Hourly shoreline position variations at the Headland were decomposed with Empirical Orthogonal Function analysis into non-synchronizing and synchronizing modes. Non-synchronizing modes are the most prevailing constituent, having opposite signs on both sides of the Headland. These are due to trapping of the longshore sediment at the Headland, and showed a moderate correlation with longshore wave energy flux and migration speeds of coastal features observed at the research pier which locates in the natural section.

1. はじめに

沿岸方向の土砂移動を許容しながら海岸管理を行うことが提唱されている(佐藤, 2007)。これの実現には、河川からの土砂供給量の把握、土砂フラックスを制御し得る構造物の開発、海岸地形と土砂フラックスを広範囲・高分解能に観測する方法の確立、観測結果の地形予測モデルへの反映方法などの要素技術の検討が必要である。

本研究では、漂砂系内の土砂管理を高度化するのに必要となる要素技術の一つである、土砂フラックスを常時モニタリングする観測手法について検討する。漂砂系内の自然的な区間と構造物で防護された区間で観測された年間の地形変動を分析し、沿岸・岸沖方向の土砂移動の動態と量の経過を連続的に把握することについて論じる。

2. 観測の概要

観測は一つの漂砂系とみなせる鹿島灘南部(鹿島港南

部から利根川河口左岸の波崎漁港、延長約17 km)に4基のXバンドレーダを設置して行った(図-1)。レーダ観測結果(図-2)と潮位記録(気象庁、銚子漁港)を用い、毎時の汀線位置を定めた。この複数レーダを用いた観測については武若ら(2011)、データの解析方法、汀線位置を定める手順については武若(2010)に説明がある。

対象域は一つの漂砂系とみなせる。北部には浜幅が100 mほどに及ぶ砂浜がある一方、南部の砂浜は狭く、5基のヘッドランド(HL)により海岸線を維持している。本研究では、2010年に取得された観測栈橋HORS($x = 0$ m, 自然的区間)とHL #4($x = 6120$ m, 構造物区間)のデータを用い、沿岸方向と岸沖方向の土砂移動と波浪の関連について議論する。

3. 観測結果

(1) 波浪

図-3に2010年の波浪観測結果(NOWPHAS, 鹿島港)

図-1 観測域と沿岸座標。▲：レーダ設置位置。HORS：港湾空港技術研究所観測栈橋。HL：ヘッドランド。

図-2 レーダ観測結果(平均画像, 2010年8月9日9時)。左: HORS, 右: HL #4。

図-3 有義波高と波向の変化 (2010年, NOWPHAS, 鹿島港)
波向 0° = 観測桟橋HORS周辺の汀線に直角入射, 正: 北方からの入射. ハッチング部は波高2 m以上の波浪が6時間以上継続した期間 (12期間).

を示す. 夏季 (6月~8月) に波高2 m以下の波が南方から継続的に入射していた. 一方, 冬季, 春季と秋季 (1月~4月, 9月~12月) には有義波高が4 mを超える高波浪が北方より多数回来襲した. これらに対応して波浪エネルギーフラックスの沿岸方向成分は, 夏季に北方, 冬季に南方に向く時間帯が多くなる. なお, この年の鹿島港の観測結果には欠測データがあり, 常陸那珂港の観測結果より補間した.

(2) ヘッドランド周辺の汀線位置の変化

HL #4の北側と南側のそれぞれ3地点に測線を設け, 計6地点の毎時の水際位置をレーダ平均画像から読み取り, その高さを潮位の観測結果から定めた. 次に, 一つの地点の14日間 ($24 \times 14 = 336$ データ) の観測結果を線形回帰して, 汀線位置 (潮位T.P. 0 mで定義) を定めた. このようにして求めた汀線位置の年間の変化を図-4に示す. 5月は計測機器のトラブル, レーダ設置位置周辺の工事等により欠測期間がある. 現地踏査, 観測結果等で確認したところ, いずれの時期もHL近傍の砂浜幅は南側が北側に比較して広がった.

先に説明した波の入射方向の季節的な変化に応じて, HLの北側と南側で汀線位置の前進・後退が逆位相的に生じることが特徴的である. HL南側の汀線位置は, 3月ごろから9月にかけて, 小さな後退が時折見られるものの, 約50 m程海側に変位している. これに対応するように, 規模は小さいが, HL北側の汀線位置が後退している. これらは, 沿岸漂砂がHLにより捕捉され, 漂砂の上手で堆積が, 下手で侵食が生じることに対応している.

以上のHL周辺の汀線位置の変動を経験的固有関数法 (EOF, 例えばEmery and Thomson, 2004) により解析し, 沿岸方向と岸沖方向の土砂移動に由来する変動成分に分

図-4 ヘッドランド周辺の汀線位置の変化
汀線位置: ヘッドランドの北側, 南側それぞれの100 m, 150 m, 200 mの位置 ($x = 5920, 5970, 6020, 6220, 6270, 6320$ m) における計測結果. 縦軸はレーダ設置地点からの距離.

図-5 EOF解析により抽出したヘッドランド両側の汀線位置変動. 上: 第1成分, 下: 第2成分と第3成分の和.

離することを試みた. 5月に長い欠測期間があるので, 1月から4月, 5月から12月の二つの時期に分けて6地点の汀線位置変動をEOFで分析し, それぞれの時期について6つの変動成分を結果として得た. なお, EOFの解析では, 各時期の変動から線形トレンドを差し引いた変動を解析した. 従って, 以降に示される解析結果は, 年間の平均的な汀線位置からの変動成分を見ることになる.

図-5にHLの両側150 m地点の第1成分 (寄与率, 1月~4月: 92%, 5月~12月: 84%) ならびに第2成分と第3成分の和 (寄与率5%, 15%) の変動を示す. 第1成分はHLの両側で逆位相の変動を見せ, HLの両側で異なる符号を示す. この変動は沿岸漂砂がHLにトラップされたことにより生じたと考えられる. 後者はHLの両側ではほぼ同位相的な変動を示しており, これは岸沖方向の土砂移動に由来するものと考えられる.

EOFにより抽出した二つの変動の時間変化率を求めた結果を図-6に示す. ここで, 時間変化率を離散的に求める際の間隔は7日間とした. 沿岸方向の砂移動に由来すると考えられる汀線変動 (第1成分) は, 穏やかな入射波が南方より継続的に入射した夏季 (6月~8月) にHL

図-6 EOF解析により抽出したヘッドランド両側の汀線位置変動の時間変化率

上：第1成分，下：第2成分と第3成分の和。

の南側で大きな値を示し、この時期に汀線位置が前進していたことを示す。第1成分はHLの南側で大きいものに対して、岸沖方向の土砂移動に由来すると考えられる変動（第2+3成分）はHLの北側で大きい。

第1成分の時間変化率の変動を用い、沿岸漂砂量のオーダーを1-Lineモデル的な考え方で検討する。移動限界水深を7 mと仮定し（Kuriyama, 2010）、図-6に示す+150 m地点の変動がHL南側200 m区間を代表すると考える。第1成分の時間変化率の符号別の年間積算値を求めると57 m/年となり、これに $1400 \text{ m}^2 (= 7 \text{ m} \times 200 \text{ m})$ を乗じると $8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{年}$ という値が得られる。Kuriyama (2010)は観測桟橋HORS周辺の年間の波浪と流れを計算し、北向の沿岸漂砂量が $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{年}$ から $50 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{年}$ の値になるとの推定結果を得ている。HLで全ての沿岸漂砂が捉えられないこと、HL設置区間では桟橋周辺に比べて土砂の移動が制限されていること、欠測期間があることなどを考えると、本観測結果から推定される沿岸漂砂量とKuriyama (2010)の推定値の間に大きな不整合はないと判断される。

(3) 観測桟橋HORS周辺の汀線位置の変化

HORSのある領域の土砂移動は構造物による影響が無い自然的なものであると期待される。岸沖方向の土砂移動は、汀線の前進・後退を調べるによりその状況を推定できる。これに対して、沿岸方向の土砂移動を知ることは簡単でない。沿岸漂砂量に顕著な空間勾配が無い場合、汀線変動よりこれを推定することは困難である。

Elsayed and Takewaka (2008)は、Xバンドレーダで年間の汀線位置の沿岸分布を調べ、a) 平均的な岸沖方向移動（波浪が大きくなると陸側に後退し、静穏期間に海側に前進）に加え、b) 汀線の波状的な分布パターンの

図-7 観測桟橋HORSで観測された汀線位置

(a) 年間の変動：平日の観測結果と14日移動平均値，(b) 14日移動平均値の変化率（時間間隔：7日）。

図-8 汀線形状に現れる波状パターンの沿岸方向移動速度
正值：南向の移動，負値：北向の移動。一つの値は3.5日間の観測結果から評価。

図-9 観測項目と関連性

沿岸方向移動が観られることを報告している。後者の移動速度 V は入射波浪の沿岸方向エネルギーフラックスに比例しており（相関係数：0.69）、パターンは入射波の下手方向に移動する。沿岸方向エネルギーフラックスは沿岸流の向きと大きさを定める要因であることから、パターンの移動を沿岸方向土砂移動の代理的なシグナルとできる可能性がある。図-2に示したレーダ平均画像には、

図-10 観測結果の関連性

上段：EOFで抽出したヘッドランド周辺の汀線位置変動（左：第1成分，右：第2成分と第3成分の和）。中段：観測桟橋HORS周辺で観られた地形変動（左：汀線の波状パターンの移動速度 V ，右：汀線位置変動の時間変化率）。下段：波浪観測結果（左：沿岸方向エネルギーフラックス P_L ，右：岸沖方向エネルギーフラックス P_C ）。

左列：沿岸方向の土砂移動に関連する観測結果。赤い破線は P_L が極値となった時点（28サンプル）。右列：岸沖方向の土砂移動に関連する観測結果。

波長数100 m程度の波状パターンが映っており，これが一日に10 m程度移動する。

ここでは，2010年に観測桟橋HORSで観測された汀線位置の変動と汀線の波状的な分布パターンの沿岸方向の移動速度を示し，次章にてHL周辺の観測結果，波浪観測結果と合わせて土砂移動を分析するのに備える。

図-7に平日に測量された観測桟橋HORS沿いの海浜断面より，高さT.P. 0 mで定義した汀線位置とその変化率（時間間隔7日）の年間変動を示す。1月から4月までは継続的に汀線位置が約20 mほど陸側に後退し，その後，9月頃まで等しい規模の前進があった。変化率の大きさは先に示したHL周辺の変化率（第2成分と第3成分の和，図-6）と同じオーダーにある。なお，レーダ観測から得られる汀線位置と測量結果の対応についてはこれまでに検証されており，レーダ観測のみからも同等の結果を取得できる（武若，2010）。

図-8には，先に説明した汀線形状に現れる波状パターンの移動速度の変化を示す。波状パターンの移動速度 V の推定はElsayed and Takewaka（2008）にある手法により行った。年の前半には北方と南方への移動が見られる。これに対して，夏季（6月～8月）には北方への移動が卓越する。これは，夏季に南方からの入射波が多かったことに対応する。

4. 土砂移動の推定

本章では，HL周辺と観測桟橋HORSで観測された汀線変動と波浪観測結果を比較し，観測域の沿岸方向と岸沖方向の土砂移動について検討する。図-9に考え方を概念的に示す。図-1に示すように，波浪観測地点（鹿島港，NOWPHAS），観測桟橋HORS，HL #4のそれぞれにおける汀線法線方向には若干の差があるが，ここでは，各地点に波浪観測で得られたのと同様の波浪があった仮定して検討を行う。観測桟橋HORS周辺の土砂移動は構造物による妨げが現れない自然的な移動によるもの，HL周辺の汀線変動はあたかも捕砂器を置いて砂の移動を調べたものとして考える。

沿岸方向と岸沖方向の波浪エネルギーフラックスをそれぞれ代表する量として， P_L と P_C を以下の式により評価した。

$$P_L \sim H^2 T \sin \theta \cos \theta \cdots \cdots \cdots (1)$$

$$P_C \sim H^2 T \cos^2 \theta \cdots \cdots \cdots (2)$$

ここで， H は鹿島港で観測された有義波高， T は周期， θ は波向である。 θ の定義は観測桟橋HORS周辺の汀線に直角入射する時に $\theta = 0$ ，北方からの入射を正とするので，北方からの波浪がある時に $P_L > 0$ となる。

図-10に本研究で得られた結果をまとめて表示する。左列に沿岸方向の，右列に岸沖方向の土砂移動に関連す

図-11 沿岸方向の土砂移動に関連する観測項目の相関性。(a) P_L と観測栈橋HORSで観られた波状パターンの移動速度 V 、(b) P_L とヘッドランド南側の汀線変動の第1成分 (EOF) の変化率、(c) V と第1成分 (EOF) の変化率。

る結果を示した。また、上段と中段にそれぞれHLと観測栈橋HORSにおける汀線位置の観測結果、下段に P_L と P_C の年間の変動を示した。

(1) 沿岸方向の土砂移動

図-10の左列に示した変動を眺めると、南方からの入射がある時に ($P_L < 0$)、HORSで見られる波状パターンが北向きに移動し (移動速度 $V < 0$)、また、HL南側の汀線位置変動 (EOF解析の第1成分) が正となる関係がおおむね認められる。

図-10の左列の破線は、 P_L が正值の時に極大値を、負値の時に極小値を迎える時点を示したものである (28サンプル)。これらの時点の P_L 、 V 、HL南側の汀線位置変化率の関係を示したのが図-11である。 P_L を説明変数として V とHL周辺の汀線変動を関連付けることに期待がもてる (図-11 (a)、(b))。また、 V とHL周辺の汀線変動の間の相関係数は低いものの、負の相関があることがうかがえる (図-11 (c))。これは、波状パターンの移動方向と沿岸漂砂の向きが一致しているが、両者の大きさの関連性についてはばらつきが大きいことを示している。以上は、自然的な区間の波状パターンの移動速度 V あるいはHL周辺の汀線変動を観測することにより沿岸漂砂量の変動を推定できる可能性があることを示す結果である。

(2) 岸沖方向の土砂移動

図-10の右列のハッチで示される部分は、波高2 m以上の波浪が6時間以上継続していた時間帯である。この時間帯には P_C が大きくなり、観測栈橋HORSで観測された汀線位置は後退していたことが多いが、前進する時間帯もあった。HORSとHL周辺の汀線変動 (EOF解析の第2成分と第3成分の和) には、波高が2 m以上となった時間帯を中心に関係性が認められHL周辺の汀線変動は岸沖漂砂に由来するものと考えられる。変動強度の差異は、自然的区間の土砂移動がHLが設置されている区間に比して活発であることによる。なお、汀線位置の前進・後退を定める要因は波浪エネルギーの他に、汀線の位置、潮位などであることが指摘されており (加藤ら、1987；

加藤ら、2006)、より精密に議論を行う必要がある。

5. 結び

漂砂系内の2地点で年間の地形変動を観測し、沿岸・岸沖方向の土砂移動をモニタリングする可能性について検討した。EOFによりHL周りの汀線変動を沿岸方向と岸沖方向の土砂移動に起因する成分に分離し、これらと自然的区間の汀線変動、入射波浪との相互の関連性を分析し、沿岸方向、岸沖方向の土砂移動を観測結果から推定する基本的な考え方を示した。

謝辞：レーダ観測、海浜地形・海象データの提供等で多大なる支援を頂いた港湾空港技術研究所沿岸土砂管理研究チームのメンバー各位に深甚なる謝意を申し上げます。研究の一部は科学研究費の補助を受けて行われた。

参 考 文 献

- NOWPHAS港湾空港技術研究所 海象情報研究室, 全国港湾海洋波浪情報網, <http://www.pari.go.jp/unit/kaisy/nwphas/>, 参照2013-05-09.
- 加藤一正・柳嶋慎一・村上裕幸・末次宏児 (1987): 短期汀線変動のモデル化の試み, 土木学会岸工学講演会論文集, Vol. 34, pp. 297-301.
- 加藤 茂・竹内麻衣子・青木伸一・栗山善昭 (2006): 判別分析を用いた定性的汀線変動予測とその予測精度に関する考察, 土木学会海岸工学論文集, Vol. 53, pp.561-565.
- 佐藤慎司 (2007): 流域と沿岸域をつなぐ土砂のフラックス管理, 日本河川協会, 河川, Vol. 736, pp. 35-38.
- 武若 聡 (2010): Xバンドレーダによる海岸地形の連続観測, 水工学に関する夏期研修会, 水工学シリーズ 10-B-6.
- 武若 聡・川上雄太・趙 卓維・柳嶋慎一・栗山善昭 (2011): 複数のXバンドレーダによる広域の海岸地形の観測, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 67, pp. L626-L630.
- Elsayed M. G. and Takewaka, S.(2008): Longshore migration of shoreline mega-cusps observed with X-band radar, Coastal Engineering Journal, Vol. 50, pp. 247-276.
- Emery W. J. and Thomson R. E.(2004): Data analysis methods in physical oceanography, Elsevier, 638p.
- Kuriyama K. (2010): Prediction of cross-shore distribution of longshore sediment rate in and outside the surf zone, Report of the Port and Airport Research Institute, Vol. 49, pp. 91- 106.