汀線位置変動に及ぼす周波数別波浪および 前浜形状の影響

A STUDY ON SHORELINE CHANGE RATE DUE TO WAVE AND FORESHORE SHAPE

鈴木崇之
Takayuki SUZUKI

正会員 博(工) 横浜国立大学准教授 大学院都市イノベーション研究院
(〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

In this paper, correlations between shoreline change rates and six frequency-sectioned wave energy fluxes were discussed using a 5-year data set of beach profiles and offshore waves observed at the Hasaki coast. Also, an effect of foreshore beach shape on shoreline backward movement speed was discussed. From the results, it is possible to separate shoreline erosion events from shoreline advance events and shoreline stand still events by using frequency-sectioned wave energy fluxes. Furthermore, the results revealed that the shoreline position and foreshore shape affect shoreline backward movement speed. This indicates that for the estimation of the shoreline change rate, we need to consider not only wave energy but also shoreline position and foreshore shape.

Key Words : *Shoreline change rate, wave energy flux, foreshore shape, berm*

1. はじめに

汀線位置は砕波帯内での波・流れの影響を受けて地形が変化することに伴い、静穏時には前進し、荒天時には後退する。この汀線位置の変動を把握し、さらに予測することは海岸保全のみならず海岸管理という面からも重要である。この汀線位置の変動を把握するにあたり、波浪との関係についてはこれまでも多くの研究者によりなされている。また、底質粒径の関係^{例えば, 1)}、沿岸砂州の影響²⁾といった面からの検討も行われている。さらに、汀線位置変動予測においても、数年から数十年の長期変動^{例えば, 3)}や、数日から数カ月の短期変動^{例えば, 4)}についても成果が報告されている。

ここで、地形変化や汀線位置変動に及ぼす周期帯別波浪の検討という面では、柴山ら⁵⁾による長周期波の漂砂に及ぼす影響や、加藤ら⁶⁾による長周期波の遡上により波打ち帯が侵食されることなどが報告されている。しかしながら、これらは周期が30秒程度以上の長周期波とそれよりも周期が短い波という区分での評価がほとんどである。

そこで、本研究では5年間分の地形断面データ、および波浪データを用いて、汀線位置変動と周波数帯別波浪の関係について検討した。さらに、汀線後退イベントに着目し、汀線後退速度と前浜地形形状

との関係についても検討を行った。

2. 現地観測データの概要

解析には、茨城県波崎海岸に位置し(独)港湾空港技術研究所が所有する波崎海洋研究施設にて計測された地形断面データ、および鹿島港沖にて計測された波浪データのうち、2001年1月から2005年12月(5年間)までを使用した。

波崎海洋研究施設(以下HORS, 図-1)では、長さ427 mの観測栈橋に沿って、休日を除く1日1回地形断面を計測している。陸上部はスタッフとオートレベルを用いて測量し、海域部は栈橋上から質量約3 kgのレッドを降ろし、海底面から栈橋までの距離を用いて測量を行っている。また、沖波波浪は鹿島港沖の水深約24 mの地点(図-1)に設置された超音波式波高計により、2時間毎に観測されている。

解析に使用した5年間の平均地形断面とその標準偏差を図-2に示す。なお、岸沖方向位置(x)はHORS固有の座標軸であり、沖向きを正としている。また、高さの基準(D.L.)は波崎港工事基準面(T.P. -0.687 m)であり、観測地点における干潮位、平均潮位、満潮位はそれぞれ-0.20 m, 0.65 m, 1.25 mである。解析期間中の平均地形断面と満潮位が交わる岸沖方向距離は $x = 5.77$ mであった。HORS周辺の底質粒径

は岸沖方向にほぼ一様であり、その中央粒径は0.18 mmである（加藤ら⁷⁾）。図中、 $x = 0 \text{ m} \sim 25 \text{ m}$ の範囲で標準偏差がやや高くなっているが、これは汀線

図-1 波崎海洋研究施設（HORS）および沖波波浪観測点の位置

図-2 解析期間中の平均地形断面（D.L. 基準）およびその標準偏差

図-3 解析期間中の有義波高（ H_s ）および有義波周期（ T_s ）の日平均値の頻度分布

付近においてバームの形成、消失が起っているためである。また、 $x = 240 \text{ m}$ 辺りを中心とした高い標準偏差は、バーの移動に伴う地形変化の影響である。加えて、 $x = -30 \text{ m}$ 辺りのピークは、観測栈橋斜路の背後地に堆積した飛砂によるものである。

鹿島港沖にて計測されている沖波波浪は、全国港湾海洋波浪情報網（NOWPHAS；例えば、永井⁸⁾）の観測点の1つである。計測結果から算出した、解析期間中における有義波高、および有義波周期の日平均値の頻度分布を図-3に示す。解析期間中、有義波高は0.39 mから5.66 mの幅で変動し、有義波周期は4.70 sから14.3 sの幅で変動していた。それぞれの平均値は1.31 m、8.10 sであった。

3. 汀線位置および周波数帯別波高の算出

(1) 汀線位置

汀線位置は波崎海岸にて計測された地形断面データから求めた。本研究では、地盤高が対象海岸における満潮位であるD.L. +1.25 mの高さを有する岸沖方向地点と定義した。この地点の変動は、飛砂によって生じた地形変化の位置（ $x = -30 \text{ m}$ 辺り）よりも海側であり、本解析ではこの影響は受けていない。

解析期間中における汀線位置の変動を図-4に示す。平均汀線位置は $x = 6.05 \text{ m}$ であり、標準偏差は11.6 mであった。汀線位置の変動は多少のばらつきはあるものの季節変動が見られ、冬季から夏季にかけて前進し、秋季から冬季にかけて後退していることがわかる。この季節変動の傾向は、HORSでの15年間分のデータを解析した鈴木・栗山⁹⁾と同一傾向である。

次に、汀線位置の日々の変化速度を基に後退時、停滞時、前進時の変動イベントの抽出を行う。汀線位置変動から算出した汀線位置変化速度の頻度分布を図-5に示す。ここで、負は汀線位置の後退、正は

図-4 汀線位置の変動（破線：平均汀線位置，点線：標準偏差）

前進を示す。変化速度の平均値は-0.01 m/dayであり、その標準偏差は1.45 m/dayであった。後退時（変化量が負）は765日あり、その平均値は-1.13 m/day、標準偏差は1.36 m/dayであった。一方、前進時（変化量が正）は994日あり、その平均値は0.85 m/day、標準偏差は0.86 m/dayであった。

ここで、汀線後退イベントの抽出条件として、後退時の平均変化速度(-1.13 m/day)よりも後退が速い日が3日以上連続した場合とし、また、汀線前進イベントの抽出条件は、前進時の平均変化速度

図-5 汀線位置変化速度の頻度分布

図-6 汀線位置変動（黒細線）および抽出された汀線位置の後退（黒太線）、停滞（緑太線）、および前進イベント（赤太線）

(0.85 m/day)よりも前進が速い日が3日以上連続した場合とした。停滞時については、変化速度が-0.5 m/day以上0.5 m/day未満が4日以上連続した場合とした。今回の判断基準により抽出されない期間については、各イベント間の変移期と捉えることとし、解析から除外した。抽出結果を汀線変動の時系列上に重ね合わせたものを図-6に示す。後退イベント、停滞イベント、前進イベントはそれぞれ31, 75, 37ケース抽出され、それぞれの平均継続日数は4.0, 4.4, 4.3日であった。

(2) 周波数帯別波高

鹿島港沖にて観測された波高データは、スペクトル解析により区分された周波数帯ごとの波高も算出されている¹⁰⁾。この周波数帯別波高は、周波数スペクトルにおいてその周波数帯のエネルギーを積分して求められたものであり、その周波数帯での有義波高に相当する波高である。そこで、本研究では有義波高に加えて、この周波数帯別波高も解析に用いることとした。波高は周波数帯別にf1からf6まで6段階に区分されており、それぞれの周期帯は32.0秒以上(f1)、16.0～25.6秒(f2)、10.7～14.2秒(f3)、8.0～9.8秒(f4)、4.3～7.5秒(f5)、4.1秒以下(f6)となっている¹⁰⁾。ただし、データの欠測期間を解析から除外したため、2001年から2005年の各年のデータ取得率はそれぞれ96.7%, 100.0%, 100.0%, 79.0%, 98.8%となった。

解析期間中における有義波高(Hs)および周波数帯ごとに区分された波高(周波数帯f1～f6の波高をそれぞれHf1～Hf6とする)の平均波高、標準偏差、最大・最小波高を表-1に示す。

解析では、有義波高、および区分された周波数帯別波高ごとに波浪エネルギーフラックスを栗山・伊東¹¹⁾に倣い算出した。有義波高と有義波周期を用いて算出した波浪エネルギーフラックス(Ef)に加え、各周波数帯のエネルギーフラックスについても、各周波数帯の中央周期(中央値)を用いて、Ef1(周期帯f1)、Ef2(周期帯f2)、Ef3(周期帯f3)、Ef4(周期帯f4)、Ef5(周期帯f5)、Ef6(周期帯f6)を算出した。

表-1 解析期間中における有義波高(Hs)および周波数帯別波高(Hf1～Hf6)の統計値

	平均波高 [m]	標準偏差 [m]	最大波高 [m]	最小波高 [m]
Hs	1.31	0.71	7.50	0.31
Hf1	0.09	0.06	0.90	0.02
Hf2	0.24	0.26	4.18	0.05
Hf3	0.67	0.52	5.18	0.11
Hf4	0.65	0.38	3.51	0.13
Hf5	0.78	0.43	2.93	0.15
Hf6	0.47	0.21	1.23	0.11

4. 汀線位置変動と周波数帯別波浪エネルギーフラックスとの関係

汀線位置の変化量により区分された後退、停滞、および前進イベントの変動開始前の汀線位置と有義波高のエネルギーフラックスとの関係を図-7に示す。ただし、エネルギーフラックスはイベント継続日数の平均値である。また、周波数帯別波高の欠測により、解析に用いた後退、停滞、前進イベント数はそれぞれ31, 69, 37となった。

停滞イベント（三角印）と前進イベント（丸印）については、前進イベントが停滞イベント時のエネルギーフラックスに挟まれる形で分布しているようにも見える。砂村¹²⁾は、汀線位置の前進後退の変動を波高の2次曲線として提案している。図-7からは明瞭な分離は困難ではあるが、その傾向は伺える。

図-7 後退、停滞、前進イベントごとに算出した汀線位置と有義波高のエネルギーフラックスとの関係（実線は後退時と停滞および前進時の判別直線）

図-8 有義波高のエネルギーフラックスおよび周波数帯別エネルギーフラックスによる後退イベントと停滞・前進イベントの判別率

一方、汀線位置後退イベント時（四角印）の沖波エネルギーフラックスは、停滞および前進イベント時のそれに比べて値が大きく、また、汀線位置が沖にあるときほど小さなエネルギーフラックスでも汀線位置が後退していることがわかる。

図中の実線は判別分析から求められた後退イベントと停滞および前進イベントの判別直線であり、この直線により汀線位置の後退イベントと停滞もしくは前進イベントを94.4%の確率（判別率＝一致数／全数×100）で判別可能であることがわかった。

これまでも、沖波エネルギーフラックスの大小を用いた汀線位置変動モデルは提案されており^{6), 13), 14)}、本解析はこれらを支持する結果となった。一方、停滞時と前進時については、沖波エネルギーフラックスによる分離は困難に見える。

次に、周波数帯別波浪エネルギーフラックスを用いて図-7と同様に汀線位置の後退イベントと停滞・前進イベントの判別を行った。周波数帯別エネルギーフラックスを用いて行った判別率、および有義波高のエネルギーフラックスによる判別率を図-8に示す。図より、32秒以上の周期帯であるf1、および10.7秒～14.2秒の周期帯であるf3での的中率が高いことがわかる。しかし、16.0秒～25.6秒の周期帯であるf2での的中率が低くなっている。加藤ら¹⁵⁾は、波崎海岸において計測した沖波波高を用いてスペクトル解析を行っており、そこでもこの周波数帯のエネルギーフラックスの低下がみられた。この理由として、Ef2の周期帯（16.0秒～25.6秒）が観測を実施している波崎海岸一帯に襲撃する波浪の代表周期と代表長周期の狭間に位置し、他の周波数帯に比べて襲撃頻度（エネルギーフラックスのパワー）が小さいためと考えられる。

ここで、有義波高(Hs)と各周波数帯別波高(Hf1～Hf6)との相関を図-9に示す。32秒以上の長周期帯で最も高い相関関係が見られた。このように長周期波を有義波高で説明できることは加藤ら¹⁵⁾も指摘している。さらに、8.0秒～9.8秒のf4周波数帯で高い相

図-9 有義波高(Hs)と各周波数帯波高(Hf1～Hf6)との相関

図-10 有義波高から算出したエネルギーフラックス(Hf)と各周波数帯エネルギーフラックス(Hf1~Hf6)との相関

関関係が見られ、また、解析に用いた波浪データの平均周期(8.10秒)前後(f3, f5)においても良い相関関係が見られた。f2周波数帯(16.0秒~25.6秒)については他と比較しても相関係数は低くなっていることがわかる。表-1の平均値と標準偏差からもわかるように、f2周波数帯では他の周波数帯に比べてばらつきが大きく、これが低下の一因であると考えられる。

次に、有義波高から算出したエネルギーフラックス(Ef)と各周波数帯のエネルギーフラックス(Ef1~Ef6)との相関を図-10に示す。こちらも波高の相関関係と同様にf2周波数帯で低い相関となっている。また、相関のピークはf3周波数帯(10.7秒~14.2秒)であった。

5. 汀線後退と地形形状との関係

汀線後退イベントは、有義波高、およびf1, f3周波数帯より算出した沖波エネルギーフラックスにより85%以上の的中率で抽出が可能であることがわかった(図-8)。ここで、各後退イベントの後退速度とイベント発生時の汀線位置の関係を図-11に示す。後退速度が-3.0 m/dayよりも速い後退イベントに着目すると、すべてのイベントの汀線位置がx = 20 mよりも沖側に位置していた。さらに、このうち67%が前浜に形成される堆積性地形であるバームの侵食を伴う後退であった。ここで、図中四角印がバーム侵食を伴う汀線位置の後退である。

次に、バームが最も発達した時の地形形状と、バームが侵食した後の地形形状の差(鉛直地形変化量)の最大値をバーム高と定義し、バーム高と汀線位置の後退速度との関係を図-12に示す。バーム高が高くなるほど後退速度が増す傾向が見られた(R = 0.61)。汀線後退時、バームの侵食が伴う場合の平均後退速度は-3.3 m/dayであり、伴わない場合は-2.1 m/dayであり、両者の速度には約1.6倍の差があ

図-11 各後退イベントの汀線後退速度(a)と後退直前の汀線位置(b)(□はバームの侵食が伴ったケース)

図-12 バーム高と後退速度との関係

ることがわかった。

これは、汀線位置変動を予測する際などには、バームといった汀線近傍(前浜)に形成される地形形状の影響を加味しなければならないことを示唆している。

6. まとめ

波崎海洋観測施設に計測された5年間の地形断面

データを用いて、汀線位置変化量から後退、停滞、前進イベントを抽出した。これらのイベントと鹿島港沖にて観測された波浪データを用いて、汀線位置変動と周波数帯別波浪との関係を検討した。その結果、汀線位置の停滞イベントと前進イベントの分離は困難であるけれども、後退イベントと停滞・前進イベントの分離については、有義波高のエネルギーフラックス、または、波浪スペクトル密度の高い周波数帯のエネルギーフラックスにより可能であることがわかった。さらに、抽出した汀線後退イベントを用いて、汀線後退速度と前浜地形形状（バームの有無）との関係についての検討により、汀線位置変動の予測には、汀線の岸沖方向位置に加えて地形形状も考慮する必要があることを示唆された。

謝辞：本研究を実施するにあたり、（独）港湾空港技術研究所、栗山善昭特別研究官、海洋水工部中村聡志上席研究官、ならびに沿岸土砂管理研究チームの中川康之チームリーダーをはじめとするチームメンバーには貴重なご意見を頂いた。本研究で利用した地形断面データは波崎海洋研究施設に常駐し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ならびに㈱ブライア・コンサルタントの観測補助員によって取得されたものである。また、沖波波浪データは国土交通省関東地方整備局鹿島港湾・空港整備事務所と独立行政法人港湾空港技術研究所海象情報研究チームより提供されたものである。ここに記して謝意を表する。本研究の一部は科学研究費補助金（若手研究B）によるものである。

参考文献

- 1) Mason, T. and Coates, T.T. : Sediment transport processes on mixed beaches: A review for shoreline management, J. Coastal Res., Vol.17, No.3, pp.645-657, 2001.
- 2) Wijnberg, K.M. and Terwindt, J.H.J. : Extracting decadal morphological behaviour from high-resolution, long-term bathymetric surveys along the Holland coast using eigenfunction analysis, Marine Geology, Vol. 126, 1-4, pp. 301-330, 1995.
- 3) Miller, J.K. and Dean, R.G. : A simple new shoreline change model, Coastal Eng., Vol. 51, pp. 531-556, 2004.
- 4) 加藤一正, 柳嶋慎一, 村上裕幸, 末次宏児: 短期汀線変動のモデル化の試み, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp.297-301, 1987.
- 5) 柴山知也, 柏木幹雄, 岡安章夫: 砕波帯内長周期波の漂砂量への効果, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp.316-320, 1992.
- 6) 加藤一正, 柳嶋慎一: 長周期波によるバームの侵食, 土木学会論文集, No.452/II-20, pp.41-50, 1992.
- 7) 加藤一正, 柳嶋慎一, 栗山善昭, 磯上知良, 村上裕幸, 藤田誠: 砕波帯内の底質粒度の変動特性 波崎海洋観測施設における現地観測, 港湾技術研究所報告, 第 29 巻, 第 2 号, pp.37-61, 1990.
- 8) 永井紀彦: 全国港湾海洋波浪観測 30 か年統計 (NOWPHAS1970-1999), 港湾空港技術研究所資料, No.1035, 388p, 2002.
- 9) 鈴木崇之, 栗山善昭: 汀線位置の長周期変動に対する汀線変化量と波浪エネルギーおよび沿岸流速との関係, 土木学会論文集 B, Vol.64, No.4, pp.280-290, 2008.
- 10) (財) 沿岸開発技術研究センター: 沿岸波浪・海象観測データの解析・活用に関する解説書, pp.70, 2000.
- 11) 栗山善昭, 伊東啓勝: 波崎海洋研究施設で観測された断面変化の卓越周期の変動特性, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp.516-520, 2004.
- 12) 砂村継男: 自然海岸における汀線位置の時間的变化に関する予測モデル, 第 27 回海岸工学講演会論文集, p.255-259, 1980.
- 13) Kench, P.S. and Brander, R.W. : Response of reef island shorelines to seasonal climate oscillations: South Maalhosmadulu atoll, Maldives, J. Geophys. Res. F: Earth Surface, Vol.111, 1, F01001, doi:10.1029/2005JF000323, 2006.
- 14) 鈴木崇之, 栗山善昭: バームの形成侵食に着目した短期地形変化モデル, 海岸工学論文集, 第 56 巻, pp.576-580, 2009.
- 15) 加藤一正, 中村聡志, 池田直太: 波の連なりと長周期波の関連に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp.101-105, 1990.