外洋に面した砂浜海岸における海浜断面の変化特性 —10年間の測量結果に基づく解析—

Characteristics of Beach Profile Change at a Sandy Coast

永坂浩平¹・青木伸一²・加藤 茂³・岡辺拓巳⁴・片岡三枝子⁵

Kohei NAGASAKA, Shin-ichi AOKI, Shigeru KATO, Takumi OKABE and Mieko KATAOKA

Sandy beach shows gradual topographic change with long-term and short-term variations corresponding to the conditions of waves and tides. Because of the irregularity in the profile change, it is difficult to investigate the characteristics of shoreline change in detail. In this research, long-term survey of the beach profiles has been carried out on three different coasts almost every week for more than ten years. The topographic data were analyzed and the characteristics of the long-term and seasonal beach profile change were discussed using the statistical methods and the empirical orthogonal eigenfunction method (EOF).

1. はじめに

わが国の砂浜海岸は年々減少する傾向にあり、その適切な管理は沿岸域の環境保全、防災機能維持および海浜利用などあらゆる面で非常に重要になっている。一般に砂浜は、短期間での侵食や堆積を繰り返しながら長期的にゆっくりとした変化を示すことがわかっている（例えば、宇多ら，1991；新藤ら，1999）。そのため、現地海岸の海浜変形や汀線変化の実態やトレンドを正しく把握するためには、できるだけ高頻度に長期間連続して海岸地形をモニタリングする必要がある。

著者らは、愛知県豊橋市の渥美半島太平洋岸（浜浜海岸，図-1）に位置する3カ所の砂浜海岸において、1999年から現在まで10年以上にわたりおよそ週に1回の頻度で継続的に砂浜断面の測量を実施してきた。さらに、これらのデータを用いて汀線変化の要因分析や予測法の検討を行っており、これまでにいくつかの研究成果を発表している（青木・小畑，2000；加藤ら，2006，2007；竹内ら，2008）。

本研究は、上記の10年間の測量データを用いて、汀線位置、砂浜の断面形状や断面積、前浜勾配など砂浜海岸を特徴づける諸量について、それらの空間的、時間的変動を統計的に整理するとともに、経験的固有関数（EOF）法を用いて砂浜断面の変動特性を長期的な視点から明らかにしたものである。

2. 対象海岸・調査内容

海浜断面の測量は図-1に示す外洋（遠州灘）に面した3箇所の海岸で実施している。A海岸（小島海岸）は通常の波の作用位置よりもかなり高い位置に消波ブロックが設置されており、ほとんど自然海浜とみなせる海岸である（写真-1）。B海岸（寺沢海岸）は高潮位・高波浪時に波が作用する位置に消波ブロックが設置されている（写真-2）。C海岸（高塚海岸）は沖合に設置された5基の離岸堤群の最も東側の離岸堤（離岸距離300m，1998-1999年施工）の背後に位置する海岸である（写真-3）。

砂浜断面測量は、毎週1回、干潮時に実施している。各海岸とも陸側に固定基準点を設け、そこから汀線に対して直角方向に測線を設定し、およそ5m間隔で波打ち際までレベル測量により砂浜の標高を計測している。ただし、毎回平均海面位置まで測量するのは困難であるため、汀線位置は朔望平均満潮位（H.W.L.）であるT.P.+88cmと砂浜表面の交点として定義している。この測量は1999年5月から始めて現在も継続しているが、本研究では2000年1月から2009年12月までの10年間のデータを用いて以下の解析を行った。

図-1 測量を行っている3箇所の海岸

1		豊橋技術科学大学大学院建設工学専攻
2	正会員	豊橋技術科学大学教授建築・都市システム学系
3	正会員	豊橋技術科学大学准教授建築・都市システム学系
4		豊橋技術科学大学産学官連携研究員建築・都市システム学系
5		豊橋技術科学大学技術職員建築・都市システム学系

写真-1 A海岸（小島海岸）

写真-2 B海岸（寺沢海岸）

写真-3 C海岸（高塚海岸）

図-2 3海岸の初期断面（2000.1.6）

図-3 各海岸の平均断面と砂面高さの標準偏差

3. 砂浜の変動特性

図-2に3海岸の初期断面（2000年1月6日時点）を示す。A海岸は測量基準点に、B海岸は基準点から20m海側の位置に消波ブロックが設置されている。

(1) 平均断面

図-3は各海岸における10年間の平均断面（実線）と砂面高さの標準偏差（点線）を示したものである。図の横軸は、各海岸の10年間の平均汀線位置を基準（ゼロ）とし、砂面高さは基準点から陸側に5m間隔で内挿してプロットしてある。なお、測量距離が平均汀線位置まで到達していないデータについては、陸側のデータから外挿して、データを補った。

図-4 汀線位置の経年変化

図-5 汀線の平均位置と標準偏差の季節変動

図より、いずれの海岸も汀線付近の砂浜の平均勾配は1/15程度となっている。また、砂面高さの標準偏差は、汀線付近ほど大きな値を示しており、汀線付近の変動が大きいことがわかる。

(2) 汀線位置の経年変化とその季節変動

図-4は測量基準点から汀線位置までの距離の経年変化を示したものである。図中の一点鎖線は10年間の汀線変化を直線近似したもので、トレンドを示している。いずれの海岸の汀線も、年間30m-40mの季節変動を繰り返しながら、長期的には前進する傾向にあることがわかる。汀線の前進速度は、A海岸で1.15m/year、B海岸で1.08m/year、C海岸で1.25m/yearであり、離岸堤背後のC海岸でやや大きいものの、大きな違いはなかった。

図-5に各月における10年間の汀線位置の平均値(実線)とその標準偏差(点線)を示す。いずれの海岸も台風などによる高波浪が影響しやすい夏季から秋季に汀線が後退し、比較的静穏な冬季から春季にかけて汀線が前進している。特に秋季以降に汀線位置の標準偏差が大きくなっており、冬季は汀線が大きく変動しつつ前進することがわかった。

(3) 断面諸量の相関

図-6はC海岸における汀線位置、砂浜断面積、前浜勾配の間の関係を示したものである。図中の点線はそれぞれの平均値を示している。ここに、前浜勾配は汀線位置を挟んだ2点間の平均勾配として、砂浜断面積は汀線位置を定義する標高(H.W.L.)より上部の砂量として定義している。図より、汀線位置と砂浜断面積においては正の相関がみられるが、前浜勾配との比較では相関はみられない。表-1に汀線位置、砂浜断面積及び前浜勾配の相関係数を示す。いずれの海岸においても汀線位置と砂浜断面積で相関係数0.8程度の高い相関を示した。ただし、前浜勾配との比較では、相関はみられなかった。

表-2に隣接海岸間での汀線位置、砂浜断面積及び前浜勾配の相関係数を示す。3つの海岸は図-1に示すように最大でも5.5km程度しか離れておらず、波浪条件は同じ

図-6 C海岸における断面諸量の関係
(左図：汀線位置と砂浜断面積，右図：汀線位置と前浜勾配)

表-1 汀線位置と砂浜断面積及び前浜勾配の相関係数

	A海岸	B海岸	C海岸
前浜勾配 vs. 汀線位置	0.13	0.07	0.23
前浜勾配 vs. 砂浜断面積	0.27	0.17	0.24
汀線位置 vs. 砂浜断面積	0.76	0.81	0.85

表-2 隣接海岸での相関係数

	汀線位置	砂浜断面積	前浜勾配
A海岸 vs. B海岸	0.34	0.50	0.13
A海岸 vs. C海岸	0.34	0.43	0.25
B海岸 vs. C海岸	0.44	0.71	0.11

であると考えられるが、B海岸とC海岸の砂浜断面積を除き、断面諸量の間にあまり相関がみられなかった。これより、長期的な汀線変化の変動傾向は各海岸で一致していても、メガカスプやバーの形成など、短期的に生じる沿岸方向の地形変化の影響により、測量日ごとのデータで比較すると汀線位置の地点間の相関は小さくなることが類推された。

(4) 砂浜断面積

表-1より、いずれの海岸も汀線位置と砂浜断面積には高い相関があることが分かった。砂浜断面積の変化量はA海岸で1.44m²/year、B海岸で1.69m²/year、C海岸で3.43m²/yearとなり、いずれの海岸も堆積傾向を示したが、汀線の前進速度に比べるとC海岸が他の海岸と比べてかなり大きな値となった。この原因としては、離岸堤の建設により砂浜の断面形状に変化が現れてきたことが考えられる。

4. 経験的固有関数法を用いた解析

経験的固有関数(EOF)法は海浜地形の変動解析に対して多くの適用事例がある(例えば、横木ら、1998; 内山ら、2002; 姜ら、2004)。この手法は、対象とするデータを空間と時間の固有関数に展開してその空間的、時間的な特徴を抽出するものであり、地形を次式のように表現する。

表-3 3海岸の各モードの寄与率

	A海岸	B海岸	C海岸
モード1	72%	78%	68%
モード2	20%	13%	12%

$$h_{ik} = \sum_{n=1}^N C_{nk} e_{ni} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 h は断面内の各地点の平均高さからの変化量、 C は時間の固有関数、 e は空間の固有関数である。また添字のうち i は基準点からの距離、 k は測量回数、 n は各モードの番号である。

本研究ではこの解析手法を用いて、上位2つのモードに関して考察を行なった。それぞれのモードの寄与率は表-3のとおりであり、この2つのモードで、A、B海岸では全体の90%以上、C海岸でも80%以上の変動を表すことができた。

(1) モード1の変化特性

図-7にモード1における3海岸の空間の固有関数を、図-8に時間の固有関数を示す。図-7より、いずれの海岸の固有関数（変形モード）も形状は類似しており、陸側で僅かに負の値をとる地点があるものの、ほぼ全域で正の値を示し、海側ほど関数値が大きくなっていることがわかる。これより、モード1は、砂浜断面の形状をある程度保持したまま全体的に前進・後退を繰り返す変形モードであることがわかる。時間の固有関数（図-8）は、いずれの海岸も不規則に変化している。

図-9はC海岸のモード1の時間の固有関数と汀線位置の変化を比較して示したものである。これより両者の変動は良く一致している。他の2つの海岸においても同様な結果となり、相関係数はA海岸で0.86、B海岸で0.77、C海岸で0.78であった。これらのことから、海浜変形の大半を表現するモード1は汀線変化に対応しており、時間関数の正負に応じた断面全体の岸沖方向への移動を表

図-7 モード1の空間の固有関数

現していると言える。

(2) モード2の変化特性

図-10にモード2における3海岸の空間の固有関数を、図-11に時間の固有関数を示す。図-10より、3つの海岸とも平均汀線位置から10m程度陸側で正負が逆転していることがわかる。時間の固有関数（図-11）については、モード1（図-8）と比較すると、全体的に変動が小さい。

図-10において e が平均汀線位置から10m程度陸側で正負が入れ替わる傾向が見られたため、その位置での砂面勾配の経時変化と時間関数の関係を比較した。図-12にC海岸の平均汀線位置から5~15m地点の平均勾配の経時変化と、モード2の時間の固有関数を示す。両者の変動は比較的良く対応していることがわかる（相関係数0.63）。この傾向は、相関の高さは異なるものの他の海岸でも同様であった（相関係数はA海岸で0.46、B海岸で0.87）。これらのことから、モード2の変形は e が0となる地点を挟んで侵食・堆積が入れ替わる断面形状の変化に対応していると言える。

5. おわりに

遠州灘表浜海岸における10年間にわたる砂浜断面測量で得られた海浜断面データを検討することにより、以下の結論を得た。

図-8 モード1の時間の固有関数

図-9 モード1の時間の固有関数と汀線変化量（C海岸）

図-10 モード2の空間の固有関数

- (1) 遠州灘では海岸侵食が問題になっているが、本研究で対象とした3地点の海岸の汀線は30m-40mの前進・後退を繰り返しつつ、長期的なトレンドとしては堆積傾向を示しており、その前進速度はおおよそ1.2m/yearであった。
- (2) 同一海岸では、汀線位置と砂浜断面積に高い相関が見られたが、前浜勾配との相関は低かった。異なる地点間については、汀線位置についても相関が低く、沿岸方向の変形モードの存在が示唆された。
- (3) 経験的固有関数 (EOF) 法を用いることにより、対象とする海岸の断面の変動特性を断面全体の一様な前進・後退 (モード1) と汀線付近の局所的な断面変化 (モード2) の2つに分けることができた。
- (4) 変動特性の大部分を表現しているモード1の時間の固有関数の変化は汀線変化と高い相関を示しており、汀線変化は主として砂浜全体の一様な前進・後退として生じていることが明らかになった。

謝辞：本研究は文部科学省科学技術振興調整費重要課題解決型研究「先端技術を用いた動的土砂管理と沿岸防災」(代表者、青木伸一：豊橋技術科学大学)の研究の一環として行ったものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 青木伸一・小畑浩子 (2000)：汀線及び前浜断面の短期変動に及ぼす異常潮位の影響，海岸工学論文集，第47巻，pp. 586-590.
- 宇多高明・伊藤弘之・斉藤友伸 (1991)：波高・周期・波向の時系列変動に対する汀線の線形応答解析，海岸工学論文集，第38巻，pp. 381-385.
- 内山雄介・栗山善昭 (2002)：複素主成分分析を用いた仙台湾蒲生干潟前面海浜地形の中期変動特性の解析，港湾空港技術研究所報告，第41巻第2号，pp. 1-20.
- 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，海岸工学論文集，第53巻，pp. 561-565.
- 加藤 茂・若江直人・青木伸一 (2007)：ニューラルネットワークを併用した順応的管理のための汀線モニタリング法の検討，海岸工学論文集，第54巻，pp. 656-660.
- 姜 炫宇・田中 仁・坂上 毅 (2004)：長期現地観測資料に基づく仙台湾海岸汀線変動特性・土砂収支の検討，海岸工学論文集，第51巻，pp. 536-540.
- 新藤 淳・加藤一正・水口 優 (1999)：長期的観測データに基づく汀線近傍の海浜変形特性，海岸工学論文集，第46巻，pp. 631-635.
- 竹内麻衣子・青木伸一・加藤 茂・浪花まなみ (2008)：後浜の地下水位変動と汀線変化の関係について，海岸工学論文集，第55巻，pp. 591-595.
- 横木裕宗・三村信男・佐藤圭輔 (1998)：主成分分析を用いた大洗港周辺の海浜地形解析，海岸工学論文集，第45巻，pp. 571-575.

図-11 モード2の時間の固有関数

図-12 モード2の時間の固有関数と勾配変化 (C海岸)