

# 港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE  
OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

**No.1316**      March 2016

波崎海岸における汀線の長期的前進傾向

伴野 雅之  
栗山 善昭  
武若 聡

国立研究開発法人 港湾空港技術研究所  
National Research and Development Agency,  
Port and Airport Research Institute, Japan

## 目 次

要 旨 .....	3
1. はじめに .....	4
2. 波崎海岸の概要 .....	4
2.1 海象 .....	5
2.2 構造物の建設履歴 .....	6
2.3 漂砂系内への土砂流入 .....	6
3. 汀線位置の決定方法 .....	8
3.1 航空写真 .....	8
3.2 基準座標系 .....	8
3.3 汀線位置の読み取りと補正 .....	9
3.4 前浜勾配 .....	9
4. 汀線変動の実態把握 .....	10
4.1 汀線位置 .....	10
4.2 汀線変動 .....	10
5. 汀線の変動特性と変動過程 .....	14
5.1 主要な汀線変動の抽出 .....	14
5.2 土砂量バランスと変動要因 .....	16
5.3 汀線の変動過程に関する考察 .....	20
6. おわりに .....	20
謝辞 .....	21
参考文献 .....	21
付録 .....	23

# Multidecadal Shoreline Change on the Hasaki Coast

Masayuki BANNO\*

Yoshiaki KURIYAMA\*\*

Satoshi TAKEWAKA\*\*\*

## Synopsis

Long-term beach morphological change under anthropogenic impacts would include many important processes for the study of coastal engineering. Beach morphological change on the Hasaki coast of Japan was influenced by anthropogenic events. From 1965 to 1977, approximately 50 million cubic meters of sediment were dumped into the nearshore zone on the north side of the coast for disposal of the sediment generated during the construction of the Kashima Port, which is an artificially-excavated port. A beach reclamation was conducted at the north edge of the coast in 1975, and a breakwater was started to extend at the south edge from 1989. Artificial headlands were also constructed on the southern part of the coast. Here, we investigated the morphological changes from 1961 to 2013 on the Hasaki coast by comparing the shoreline positions extracted from fifteen aerial photographs, which were taken every 3 to 5 years.

We found significant trend of shoreline advancement with the spatial variation due to longshore sediment transport in the past shoreline evolution on the Hasaki coast. The first shoreline advance around the northern part of the coast from 1969 to 1984 was considered to be caused by an increase in the total sediment volume on the coast due to the dump of the excavated sediments. The second shoreline advance after 1993, which was caused over the whole of the coast from 1993 to 1996 and around the southern part of the coast after 1996, was considered to be caused by landward cross-shore sediment transport. Since the time when the artificial headlands were constructed was almost the same period of remarkable advance around the southern part of the coast from 2002, they possibly contributed to trapping of the cross-shore and longshore sediment transport, but the reason why the sediments were transported landward is still unknown.

**Key Words:** shoreline change, aerial photograph, EOF analysis, cross-shore sediment transport, artificial headland, coastal structure

---

\* Senior Researcher, Coastal and Estuarine Sediment Dynamics Group, Coastal and Estuarine Environmenta Field  
\*\* Distinguished Researcher  
\*\*\* Professor, Graduate School of System and Information Engineering, University of Tsukuba  
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan  
Phone: +81-46-844-5045 Fax: +81-46-844-1274 e-mail:banno-m@pari.go.jp

# 波崎海岸における汀線の長期的前進傾向

伴野 雅之\*・栗山 善昭\*\*・武若 聡\*\*\*

## 要 旨

茨城県波崎海岸の海浜地形は、過去に様々な人為的影響を受け、変化した。過去の波崎海岸における最も特徴的な人為的イベントは、1965年から1977年にかけて行われた土砂の海洋投入であり、鹿島港建設時に発生した約5000万 $\text{m}^3$ もの土砂が波崎海岸北側に海洋投入された。また、波崎海岸の北側では鹿島港の整備が1960年代より始められ、海岸の南側では波崎漁港の整備が1970年代より始められた。それに伴って、海岸南北には防波堤や護岸などの人工構造物が建設された。さらに、1980年代後半から2000年にかけて、海岸の南部にヘッドランドが建設された。このような人為的影響下における海浜地形の長期的な変化の実態を把握することは海岸工学上、非常に有用な資料となりうる。そこで本研究では、航空写真を用い、1961年から2013年までの波崎海岸全体の汀線変動の実態を把握し、その変動特性をEOF解析によって整理し、その変動を引き起こした要因と変動過程について考察した。

その結果、波崎海岸では過去に長期的な汀線の前進傾向が生じていたことが明らかとなり、同時に北向きの沿岸漂砂による汀線の変動が生じていたことが示された。第一の前進傾向は、土砂の海洋投入直後の1969年から1984年に生じた海岸北部を中心とした汀線の前進であり、これは土砂の海洋投入により漂砂系内の土砂量が増加したことによるものと考えられた。第二の前進傾向は、上述の汀線の前進が一度収束してから約10年が経過した1993年以降の汀線の前進であり、1993年から1996年には海岸全域で生じ、1996年以降は海岸南部を中心として生じた。この前進は主に沖から岸に土砂が移動したことによるものと考えられた。特に2002年以降の汀線の前進はヘッドランドおよび波崎漁港西防波堤周辺で顕著であり、これは岸近くで卓越する北向きの沿岸漂砂がヘッドランドによって捕捉されたためであると考えられた。このことから、長期的な海浜地形変化において岸沖漂砂が大きく寄与する可能性があることが示され、長期的な地形変化を予測する上で岸沖漂砂の影響を十分に考慮することが必要であると考えられた。

キーワード：汀線変化，航空写真，EOF解析，岸沖漂砂，ヘッドランド，海岸・港湾構造物

---

\* 沿岸環境研究領域沿岸土砂管理研究チーム主任研究官  
\*\* 研究主監  
\*\*\* 筑波大学大学院システム情報工学研究科教授  
〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1 港湾空港技術研究所  
電話：046-844-5045 Fax：046-844-1274 e-mail:banno-m@pari.go.jp

## 1. はじめに

海浜地形は波浪などの自然外力の変化によって時々刻々変化するとともに、構造物などの建設による人為的な物理環境操作によっても大きく変化することがある。茨城県波崎海岸においては、1960年代から1970年代にかけて鹿島港建設時に発生した大量の土砂が海洋投入された。その後、波崎海岸の北に位置する鹿島港と南に位置する波崎漁港の整備に伴い、海岸の北側および南側において、防波堤や護岸といった構造物が建設された。また、海岸南部においては、海岸侵食対策としてヘッドランドが建設された。このような様々な人為的影響下における海浜地形の長期的な変化の実態を把握することは、海岸工学上、有用な資料となりうる期待される。

航空写真から読み取った汀線位置の比較は、長期的かつ広域的な地形変化を評価するために、比較的良好に用いられる手法の一つである（例えば、田中ら、1973; 齊藤ら、1985; 滝沢ら、1987; 宇多ら、1993; 宇多ら、1994; 長島ら、2005; 安本ら、2006）。航空写真は瞬間的な海岸の状態が記録されたものであるため、一時的な侵食などによって、必ずしもその時期の地形を代表しているとは限らないが、日本各地で撮影された航空写真としては、古くは戦後に米軍が撮影したものもあることから、過去の海岸の状態を知ることのできる有用な資料の一つである。なお、過去数十年間の航空写真については主に国土院などの行政機関によって3年から5年間隔で撮影されており、最近では衛星写真などによってさらに高頻度な空中写真を入手することも可能である。

波崎海岸についても、いくつかの研究において、航空写真から求めた汀線変動にもとづいて、過去の地形変化の評価が行われており（例えば、田中ら、1973; 佐藤ら、2000; 宇多ら、2007; 関寺ら、2015）、沿岸漂砂の卓越方向や河川からの土砂供給量の検討、土砂移動メカニズムの推定がなされている。これらの汀線変動の解析に用いられた航空写真の期間は、それぞれ田中ら（1973）の解析が1947年から1961年、佐藤ら（2000）の解析が1947年から1996年、宇多ら（2007）の解析が1984年から2002年であり、いずれも解析期間が短かったり、近年の資料を含んだものではなかったりするものであり、鹿島港の建設開始以降の汀線変動を50年間スケールで検討した事例はない。関寺ら（2015）については、1947年～2012年の汀線位置を示しているものの、解析については1984年以降の汀線変動に限ったものである。このことから、本研究においては1961年から2013年までの航空写真を用い、鹿島港の建設開始後から約50年間の波崎海岸全体の

汀線変動の実態を俯瞰的に把握した。さらに、航空写真から読み取った汀線位置に対して、経験的固有関数法（Empirical Orthogonal Function Analysis, 以下、EOF解析）を用い、主要な汀線変動を抽出することで、その変動特性を整理し、その変動を引き起こした要因と変動過程について考察した。とりわけ、本研究では、波崎海岸の汀線が長期的な前進傾向を有していたことを報告し、その要因についても考察した。

なお、波崎海岸における最も古い入手可能な航空写真は1947年に米軍によって撮影されたものであるが、1947年の航空写真の撮影時刻は不明であり、撮影時の潮位を推定できず、後述の汀線位置の補正を行えないことから、本研究では撮影時刻が明らかな1961年以降の航空写真のみを解析対象とした。なお、1947年から1961年までの14年間の汀線の前進・後退量は最も大きい場所でも20 m程度であり、本研究により得られたそれ以降の汀線変動と比較しても小さかった（佐藤ら、2000）。

## 2. 波崎海岸の概要

本章では、波崎海岸の概要を述べるが、特に表記がない場合には現在における波崎海岸の状況を述べたものである。波崎海岸は太平洋に面し、鹿島灘南部に位置する全長約16 kmの砂浜海岸である（図-1）。前浜部の底質の中央粒径は約0.18 mmであり、後浜には比較的大きい砂丘（頂部高:T.P.+6 m～10 m程度）が存在している（例えば、柳嶋、2012）。なお、波崎海岸の沿岸方向は南北方向よりも反時計回りに30°程度傾いているが、本研究では便宜的に海に向かって沿岸方向左側を北、右側を南と呼ぶことにする。

波崎海岸北側には鹿島港、南側には波崎漁港が位置しており、海岸北端境界面には鹿島港南海浜埋立地の護岸（以下、鹿島港南海浜護岸と呼ぶ）があり、海岸南端境界

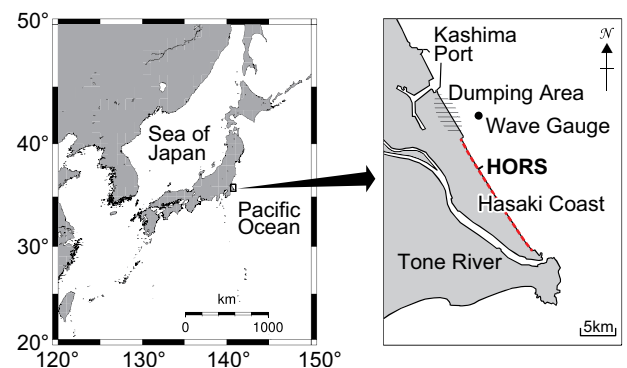


図-1 波崎海岸（赤点線）と土砂の海洋投入位置（斜線）

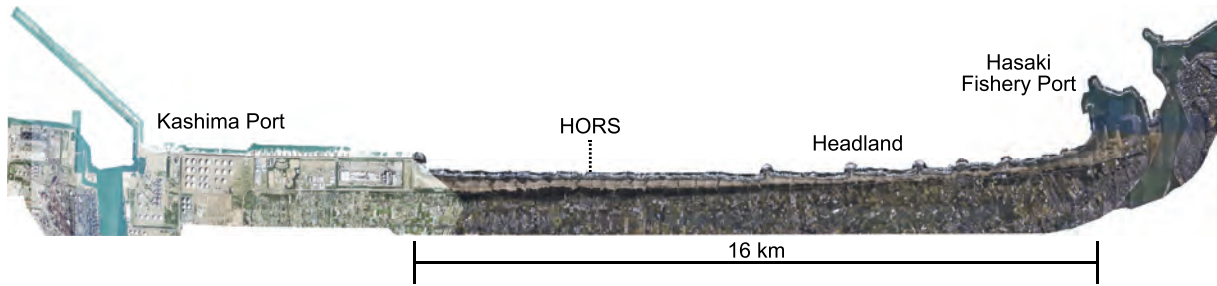


図-2 波崎海岸全体写真（横方向に縮小），北から鹿島港，波崎海洋研究施設，ヘッドランド，波崎漁港が位置する。

面には波崎漁港の西防波堤がある（図-2）。このように現在の波崎海岸は南北を構造物に囲まれていることから一つの漂砂系としてみる事ができる。また，海岸南部には5基のヘッドランドが整備されている。これらの構造物の建設履歴については後述する。なお，海岸北部には波崎海洋研究施設（通称，HORS）の観測用栈橋があるが，この栈橋による地形変化への影響は栗山（2008）の検討から小さいと考えられることから，本研究においては特に海岸構造物として取り扱わず，地形変化への影響についてもないものと仮定した。

## 2.1 海象

全国港湾海洋波浪情報網（NOWPHAS）の観測点「鹿島」（鹿島港沖，水深約24 m，図-1）では，波浪が定常観測されており，有義波高や有義波周期などの情報が得られる。1972年から1999年までの波浪統計によると，平均有義波高は1.35 mであり，2 m以上の有義波高の出現頻度は15%，3 m以上の有義波高の出現頻度は3%，4 m以上の有義波高の出現頻度は0.7%であった（永井，2002）。NOWPHASの波浪データをもとに波浪の季節変動を整理すると，沖波波高は4月～8月頃の春夏期に小さく，9月～3月頃の秋冬期に大きい傾向が見られた（図-3）。また，HORSにおいて観測された気象・海象データから，春夏期には南風に伴って南よりの波が入射し，秋冬期には北風に伴って北よりの波が入射することが明らかにされており，これに対応して沿岸流の卓越方向は春夏期には北向き，秋冬期には南向きといった季節的な変動を有することが示されている（Kuriyama et al., 2008）。さらに長期的に沿岸流を見ると，汀線付近では北向きの沿岸流が卓越し，岸から約150 m離れた場所よりも沖側では南向きの沿岸流が卓越することが明らかにされており（図-4），それに伴って沿岸漂砂量もそれぞれ汀線付近では北向き，沖では南向きが卓越することが明らかにされている（Kuriyama et al., 2014）。なお，波高や周期，波向の平均値やばらつきは時間的に変動していると考えられるものの，その特性に顕著な変化は経年的に見られなかった

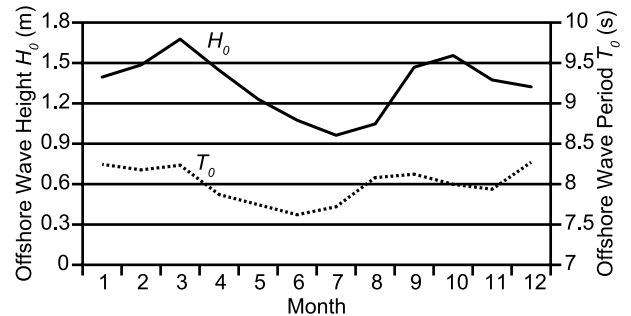


図-3 1986年～2010年にNOWPHASで観測された「鹿島」の月別平均波高および周期

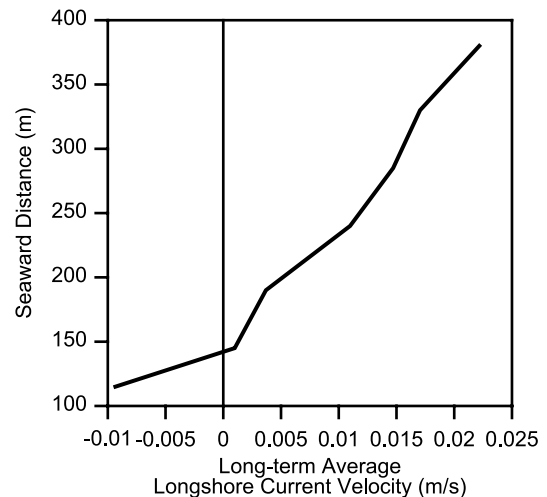


図-4 波崎海洋研究施設で観測された沿岸流速（北向きを正）の長期間平均値の岸沖分布，Kuriyama et al.(2008)から編集。

ことから，波崎海岸の海象特性は本資料における対象期間を通じて一定であったと考えた。

また，波崎海岸における1973年から2009年の朔望平均干潮面（L.W.L.），平均海水面（M.W.L.），朔望平均満潮面（H.W.L.）は，鹿島港工用基準面（D.L. = T.P. -091 m）を基準にすると，それぞれ0.03 m，0.89 m，1.49 mである（関東地方整備局鹿島港湾・空港整備事務所，2011）。以後，特に表記がない場合，高さの基準は鹿島港工用基準面とする。

## 2.2 構造物の建設履歴

### (1) 鹿島港

鹿島港は1962年に地方港湾に指定され、翌年重要港湾に指定されると同時に、工業整備特別地域の指定を受け、本格的な整備が始められた（図-5、付録A表-A.1）。特に、鹿島港の南防波堤は延長約4 km（先端水深約20 m）の大規模な構造物である。鹿島港南海浜護岸は後述の土砂の海洋投入により堆積した海浜の一部を埋め立てた場所に建設されたもので、1975年までに沿岸方向に6.4 kmの区間が整備された。護岸前面の海中部には潜堤が築造されている。護岸整備後、護岸海側前面には海浜は南防波堤の付け根付近のごく一部を除いて存在しない。

### (2) 波崎漁港

波崎漁港は利根川河口に位置する漁港であり、1951年に第3種漁港の指定を受けた後、1973年から漁港漁場整備長期計画に基づき現在の位置に整備され、1985年に波崎新漁港として開港した。その後も防波堤の建設が進められ（図-6、付録A表-A.2）、西防波堤の延長は2006年時点で約1 km、東防波堤の延長は2008年時点で約2 kmとなっており、それぞれ防波堤先端の水深は約6 m、約9 mである。

### (3) ヘッドランド

波崎海岸南部の海岸侵食とそれに伴う平均粒径の粗粒化（佐藤ら、2000）の対策として、1986年より5基のヘッドランドが順次、建設された（図-7、付録A表-A.3）。2000年までに全てのヘッドランドは完成し、南側から順にNO.1からNO.5と番号が付けられている。いずれのヘッ

ドランドの長さも基部から沖方向に約150 mであり、ヘッドランドの頭部分の長さも約150 mである。

## 2.3 漂砂系内への土砂流入

一つの漂砂系内の地形変化を考える上では、漂砂系内外への土砂の流出入量を十分に考慮する必要がある。漂砂系外への土砂流出は、沿岸漂砂による系外への土砂移動や岸沖漂砂による沖への土砂損失の二つが主なものであるが、これらの流出量を正確に推定することは通常難しい。漂砂系内への土砂流入は沿岸漂砂による系内への土砂移動と養浜などによる土砂投入が考えられ、前者は主に河川を起源とすることが多い。これらの流入量の推定についても、同様に正確な推定は困難ではあるが、本節では1961年から2013年における波崎海岸の流入土砂の供給源として、利根川と那珂川の二つの河川からの土砂供給と鹿島港建設時の土砂の海洋投入およびヘッドランド周辺における養浜による人為的な土砂供給について説明する。

### (1) 利根川からの土砂供給

利根川は波崎漁港の南側に河口を有する。利根川からの土砂供給量については必ずしも十分には明らかにされていないものの、前述した波崎漁港東防波堤の延伸に伴い、波崎海岸への供給土砂量は減少していったと考えられる。しかしながら、佐藤・田中（1962）の表層移動限界式を用い、波高2 mの波浪に対する波崎海岸の移動限界水深（周期8 sec、底質粒径0.2 mmの場合）を求めると、

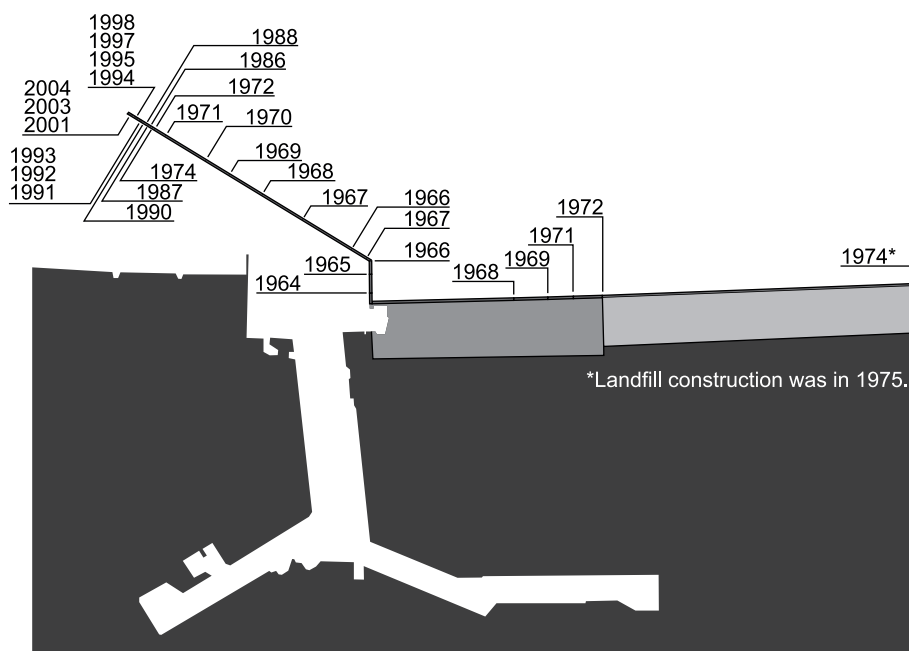


図-5 2004年までの鹿島港南防波堤および南海浜護岸の建設履歴，建設年を記す。

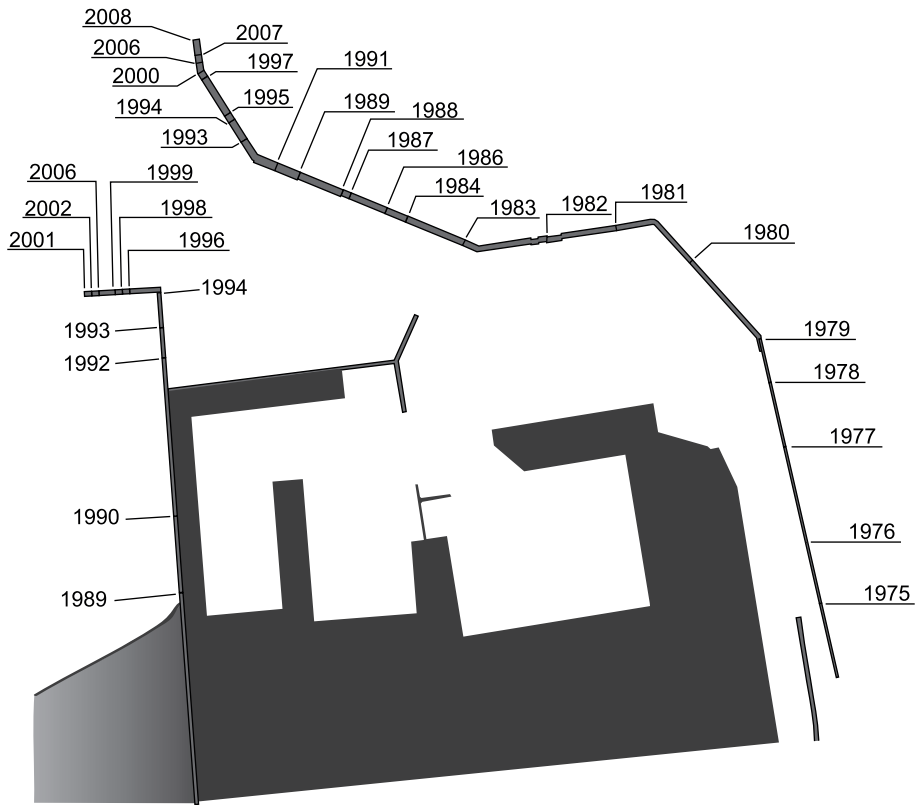


図-6 2008年までの波崎漁港西防波堤および東防波堤の建設履歴，建設年を記す。

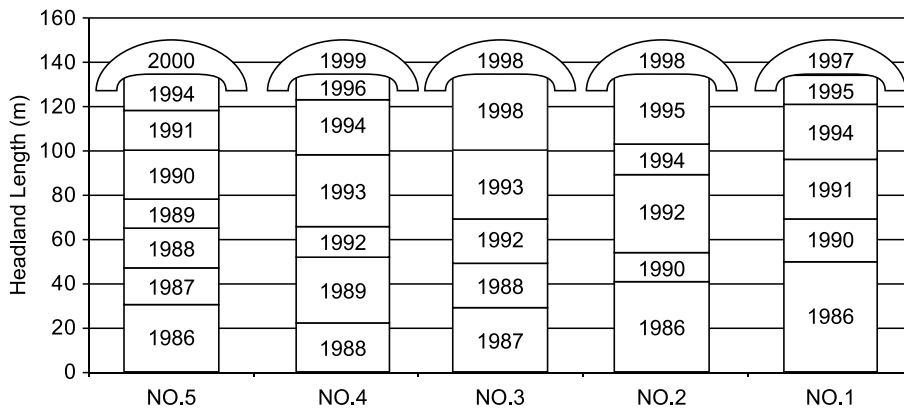


図-7 波崎海岸南部における各ヘッドランドの履歴，建設年を記す。

水深約10 mと算出され，2008年時点の波崎漁港東防波堤先端の水深は約9 mであることから，有義波高2 mを超えるような高波浪（出現頻度15%）が生じた場合には，防波堤を回りこんで海底の土砂は移動すると考えられ，波浪の出現頻度から考えると，比較的頻繁に防波堤を回りこむ土砂の移動が生じており，利根川からの流出土砂の一部は波崎海岸地形変化に寄与していると考えられる。

宇多ら（2007）は1992年から2002年の深浅測量の結果から利根川からの土砂供給により約5万 m<sup>3</sup>/yearの細粒の土砂が移動限界水深よりも沖の波崎漁港沖に堆積したこ

とを示している。この値は波崎漁港沖に堆積した量のみであるので実際の供給土砂量は，5万 m<sup>3</sup>/yearよりも多いと考えられる。

#### (2) 那珂川からの土砂供給

那珂川は波崎海岸から約50 km北側に河口を有する。鹿島港建設以前においては秋冬期における南向きの沿岸漂砂によって，那珂川から流出した土砂が波崎海岸まで到達していたと考えられるが，鹿島港南防波堤の延伸に伴い，波崎海岸への土砂供給量は減少していったと考えられる。波高3 mの波浪に対する移動限界水深を前述同様に



求めると、水深約18 mと算出されるが、現在の鹿島港の南防波堤先端水深は約20 mであることから、有義波高3 mを超えるような高波浪（出現頻度3%）が生じた場合のみ防波堤を回りこんで海底の土砂は移動すると考えられ、波浪の出現頻度から考えると、防波堤を回りこむ土砂の移動はほとんど生じておらず、那珂川から漂砂系内に供給される土砂量は非常に小さくなっていったと考えられる。

### (3) 人為的な土砂供給

鹿島港の建設は1961年に開始され、その建設工事に伴って約8600万 m<sup>3</sup>の土砂が発生した。その内、約5000万 m<sup>3</sup>の土砂が鹿島港南側（波崎海岸北側）の汀線から500 m以内の浅海域に1965年から1977年にかけて海洋投入された（図-8）。その海洋投入によって汀線が大幅に前進した領域の一部は埋め立てられ、南海浜護岸が整備された。一様勾配（1/50）の海浜上に埋め立てを行ったと仮定して、その埋立土量を概算すると、約380万 m<sup>2</sup>（沿岸6400 m×岸沖600 mの埋立面積）×12 m（岸沖600 m区間の高低差）×0.5（三角形近似）で約2300万 m<sup>3</sup>となり、前述の海洋投入土砂量約5000万 m<sup>3</sup>の内、約2700万 m<sup>3</sup>が海浜の地形変化に寄与した土砂量として計上できる。この土砂の海洋投入は1965年から1977年に限ったものであるが、投入された土砂量が非常に多いことから波崎海岸の長期の海浜地形変化を考える上では重要なものである。

また、ヘッドランド周辺において、2000年から2003年にかけて養浜事業として海浜上（T.P.+1.3 mからT.P.+3.5 m）に波崎漁港の浚渫土砂（粒径0.1 mmから0.2 mm程度）が合計約13万 m<sup>3</sup>投入された。この土砂量は利根川からの供給土砂量や海洋投入土砂量と比較すると非常に少ない。

## 3. 汀線位置の決定方法

### 3.1 航空写真

本研究で汀線位置の読み取りに用いた航空写真は1961年、1965年、1969年、1974年、1979年、1984年、1987年、1990年、1993年、1996年、1999年、2002年、2005年、2009年、2013年の15枚で、年ごとに複数枚の航空写真（表-1）を重ね合わせ、海岸全体を1枚の写真にしたものである（付録B 図-B.1、図-B.2、図-B.3、図-B.4）。

### 3.2 基準座標系

本研究ではHORSの観測栈橋を基準とした座標系を用いた（例えば、柳嶋ら、2012）。本座標系は世界測地系平面直角座標IX系におけるX=-17237.33、Y=83864.05（栈橋基部付近）を原点として、座標軸を時計回りに59°回転さ

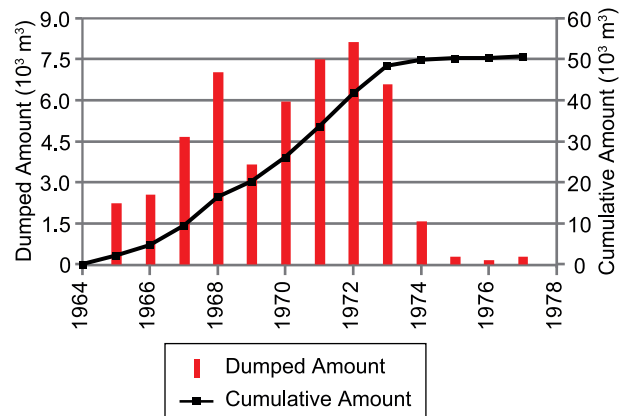


図-8 波崎海岸に海洋投入された土砂量の推移

表-1 汀線位置の読み取りに用いた航空写真の撮影日

Year	Date	Year	Date
1961	1961/7/26	1979	1979/9/5
1965	1965/9/30	1979	1979/11/14
	1965/10/5	1979	1979/12/3
	1965/10/24	1984	1984/8/6
	1965/10/28	1987	1987/11/10
1969	1969/4/28	1990	1990/12/17
1974	1974/12/26	1993	1993/12/16
	1975/1/3	1996	1996/12/9
	1975/1/11	1999	1999/12/22
	1975/1/20	2002	2002/10/31
	1975/2/9	2005	2005/10/23
	1975/2/13	2009	2009/8/25
	1975/2/18	2013	2013/8/28

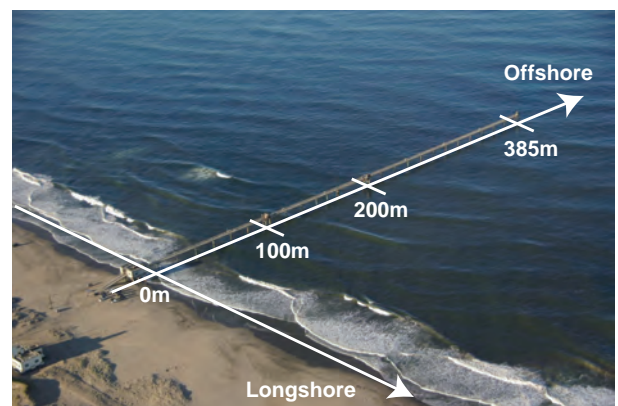


図-9 HORSの観測栈橋を基準とした座標系

せたものであり、岸沖方向の座標軸は栈橋に平行、沿岸方向の座標軸は栈橋に垂直となっている（図-9）。すなわち、沿岸方向の位置は栈橋からの距離（南方向を正）で表され、汀線位置は栈橋基部を基準とした相対的な岸沖位置（沖向きを正）で表される。以後、特に表記がない場合、沿岸方向位置をx、岸沖方向の汀線位置をyとして

表す。

なお、本基準座標系における海浜の北端境界（鹿島港南海浜護岸）の位置は $x = -4100$  m、南端境界（波崎漁港防波堤）の位置は $x = 11810$  mである。また、ヘッドランドの位置はそれぞれ $x = 4190$  m,  $6120$  m,  $7700$  m,  $8670$  m,  $9770$  m付近である。本研究においては、汀線位置の解析対象を $x = -4000$  mから $x = 11700$  mとした。

### 3.3 汀線位置の読み取りと補正

本研究では航空写真から沿岸方向10 m間隔で汀線位置を読み取った。その際、汀線位置として基本的には水際線を読み取ったが、航空写真における砂浜の色合いから波の遡上による湿潤範囲が広いと認められる場合には、波の遡上限界と引き波による水際線の間を読み取った。

読み取られた汀線位置は写真撮影時の潮位による影響を受けている。そこで本研究では、読み取られた汀線位置に対して、式(1)によりM.W.L.の潮位を基準とした補正を行った。

$$y = y' + \frac{\Delta\eta}{\tan\beta} \quad (1)$$

ここで、 $y$ ：潮位補正後の汀線位置 (m)、 $y'$ ：航空写真より読み取った汀線位置 (m)、 $\Delta\eta$ ：撮影時潮位とM.W.L.の差 (m)、 $\beta$ ：前浜勾配である。

撮影時の潮位については、実測の潮位を利用することが望ましいが、対象とした航空写真のすべての撮影時において、実測の潮位を得られないことから、本研究では、推算潮位（天文潮）を用いて補正を行った。一方で、実際の汀線付近の水位は、波浪によるwave setupや気圧低下による吸い上げなどの影響によって、天文潮と比較して高くなることが多く、天文潮による汀線位置の補正には誤差が生じる可能性がある。しかしながら、天文潮を基

準とした波崎海岸の汀線付近における水位上昇量は、10 cmから20 cmの間にある頻度が最も多く、0 cmから30 cmの上昇量である頻度が全体の80%以上（加藤ら，1989）であることから、航空写真間での水位上昇量の差は10 cm程度と見積もられ、前浜勾配が1/50の場合、補正における誤差は5 m程度と考えられる。このことから、本研究においては、これらの水位上昇については無視した。

補正に用いた前浜勾配については、後述の2006年に行われた航空レーザ測量結果をもとに算出した。前浜勾配は経時的な底質粒径の変化などの影響で本研究対象期間である1961年から2013年の間で必ずしも一定ではないと考えられるが、過去の前浜勾配を推定することは難しいことから、本研究においては、前浜勾配は時間的に一定であると仮定した。

### 3.4 前浜勾配

汀線位置の補正に用いた前浜勾配は2006年11月8日（午前11時26分から49分まで）に行われた航空レーザ測量により得られた地形情報をもとに算出した。具体的には、得られた地形情報（LASTモードのポイントデータ）から沿岸方向10 m間隔、岸沖方向2 m間隔で平均地盤高データを作成し、沿岸方向10 m間隔の測線ごとに高さ1.3 mから2.0 mの範囲の平均地盤高データを線形回帰することにより求めた（図-10）。なお、上記の高さの範囲は、レーザデータに水面による読み取り誤差の影響が表れず、パームなどによる勾配の急変点よりも低い範囲として試行錯誤的に決定した。2006年の前浜勾配は局所的な緩急はあるものの、 $x = -4000$  mから $x = 2000$  mまではほぼ一定で、さらに南側においては $x = 7000$  mにかけて急勾配となり、再び南端にかけて緩勾配となる。なお、2005年にも同様の航空レーザ測量が行われているが、前浜勾配の沿岸方向分布に大きな傾向の変化は見受けられなかった。

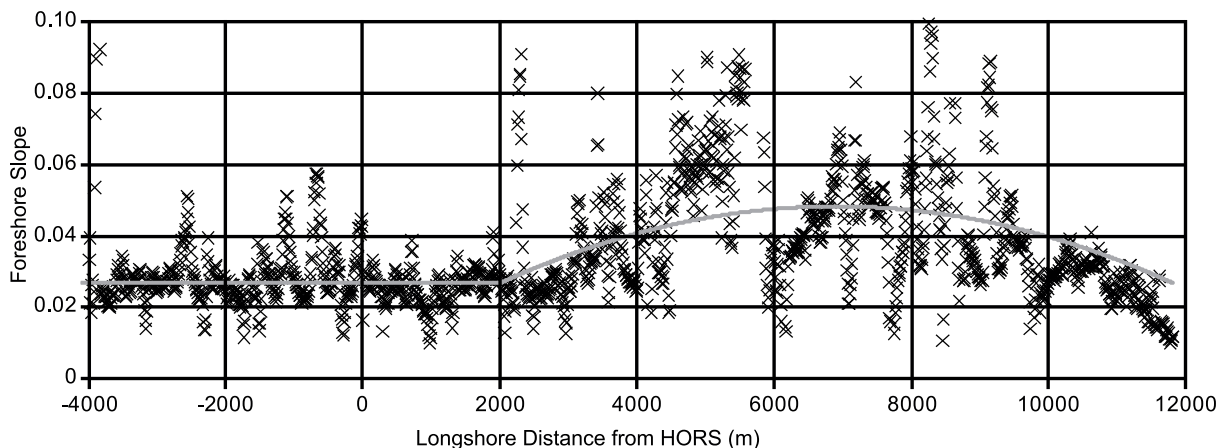


図-10 2006年における前浜勾配の沿岸方向分布および近似曲線（式(2)）

本研究では上述の前浜勾配の沿岸方向分布を考慮して、汀線位置の補正に用いる前浜勾配は式(2)の近似式を用いて決定した。

$$\begin{aligned} \tan \beta &= 0.027 & (-4000 \leq x \leq 2000) \\ \tan \beta &= -9 \times 10^{-10} (x - 2000)^2 + 9 \times 10^{-6} (x - 2000) + 0.027 & (2000 \leq x \leq 11800) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 $\beta$ ：前浜勾配， $x$ ：沿岸方向位置 (m)である。

## 4. 汀線変動の実態把握

### 4.1 汀線位置

2013年時点の波崎海岸の汀線は緩やかな弧を描いた形状をしており、海岸両端やヘッドランド周辺では局地的に異なった汀線形状が見られた(図-11)。 $x = 0$  m付近では汀線は $x$ 座標軸に対してほぼ平行であるが、 $x = 4000$  mより南側では汀線は座標軸に対して傾いており、基準座標上の汀線位置は相対的に沖に位置している。しかしながら、実際には浜幅は北側の方が広く、南側の汀線位置が基準座標上沖に位置しているのは、背後地形が弧型であるのに対して直交座標を設定したことによるものである。

なお、航空写真から得られた汀線位置は、実際に測量により求められた汀線位置とほぼ一致しており(決定係数 $R^2 = 0.99$ 、標準偏差S.D. = 11.7 m、付録C 図-C.1、図-C.2)、航空写真より読み取った汀線位置は十分な精度を有していると考えられる。また、航空写真から得られる汀線位置は撮影時の瞬時値であることから、その年の代表値として用いる際には、季節変動などの短期的な地形変動の影響を内包していると考えられる。波崎海洋研究施設の観測結果から得られた汀線位置によると1年間の日々の汀線位置のばらつきは標準偏差S.D. = 10 m程度(付録D 図-D.1)であったことから、読み取られた汀線位置はその年の平均値と比較して、10 m程度の差を有している可能性がある。

### 4.2 汀線変動

本節では、汀線変動の実態を概説する。記述を簡便にするために、本節では便宜的に三つの時期に分けて記述する。各時期は主な人為的イベントによって特徴づけられる(1961年～1984年：土砂の海洋投入や南海浜護岸の建設が行われた時期、1984年～2002年：ヘッドランドが建設され、波崎漁港西防波堤の建設が始められた時期、2002年～2013年：人為的イベントの少ない時期)。

#### (1) 1961年～1984年

1961年の汀線位置を基準とすると、1965年、1969年までには大きな汀線位置の変化は見られないものの、 $x = 6000$  mより南側で汀線がわずかに後退し、 $x = -2000$  m～ $6000$  m付近で汀線が前進している傾向が見られた(図-12)。なお、1965年より本解析対象領域よりも北側の陸に近い場所(鹿島港寄りの現在の鹿島港南海浜護岸付近)において土砂の海洋投入が始まっており(図-1、図-8)、投入位置付近の海浜では投入直後に堆積が生じた(佐藤ら、1974)ものの、本解析対象領域の1969年までの汀線変動には、その影響は見られなかった。

一方で、土砂の海洋投入と並行して、海岸北端の鹿島港南海浜護岸の建設がなされた後の1969年から1979年にかけては、 $x = 6000$  mより北側の汀線は大きく前進しており、海岸北端( $x = -4000$  m)の汀線は200 m以上前進した(図-12)。海岸北部では大きく汀線が前進した一方で、その前進量は南に向かうほど小さくなり、 $x = 6000$  mより南側では1969年以前と同様に汀線がわずかに後退している傾向が見られた(図-12)。

その後、1979年から1984年にかけては、 $x = -4000$  m～ $-1000$  m付近の汀線はやや後退し、 $x = -1000$  m～ $8000$  m付近において汀線が前進した。

#### (2) 1984年～2002年

1984年以降の海岸南部では、それまでと同様に汀線の後退傾向が見られたと同時に、波崎漁港の防波堤やヘッドランドの建設に伴った局所的な汀線変動が見られた。海岸南端( $x = 11700$  m)の汀線位置は波崎漁港西防波堤の建設とともに前進し続け、1984年から2002年までの間に250 m以上前進した(図-12)。また、ヘッドランドの建設に伴って、ヘッドランド直近傍( $x = 4200$  m,  $6100$  m,  $7700$  m,  $8700$  m,  $9800$  m付近)およびヘッドランド南側領域において汀線の前進が見られた。一方で、ヘッドランド直近傍を除く、ヘッドランド北側領域において汀線の後退が見られ、NO.5、NO.4、NO.3のヘッドランドの北側( $x = 3500$  m,  $5500$  m,  $7000$  m付近)においては、ヘッドランド建設以前の1984年と比較して、2002年までに最大で30 mから50 m程度の汀線の後退が見られた(図-12)。一方で、 $x = 3000$  mより北側の汀線変動には、明確な傾向が見られなかった。

#### (3) 2002年～2013年

2002年以降、それまでに大きく汀線が後退してしまっていたヘッドランド間( $x = 4300$  m～ $5800$  m,  $6200$  m～ $7400$  m,  $7800$  m～ $8400$  m,  $8800$  m～ $9500$  m付近)の汀線が前進し、2002年から2009年の間で40 mから60 m程度前進した。2009年から2013年にかけては、No.3～No.5

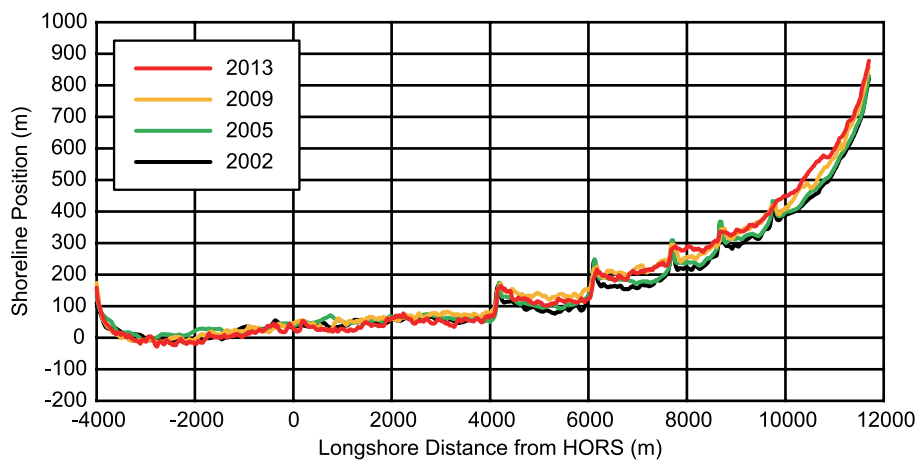
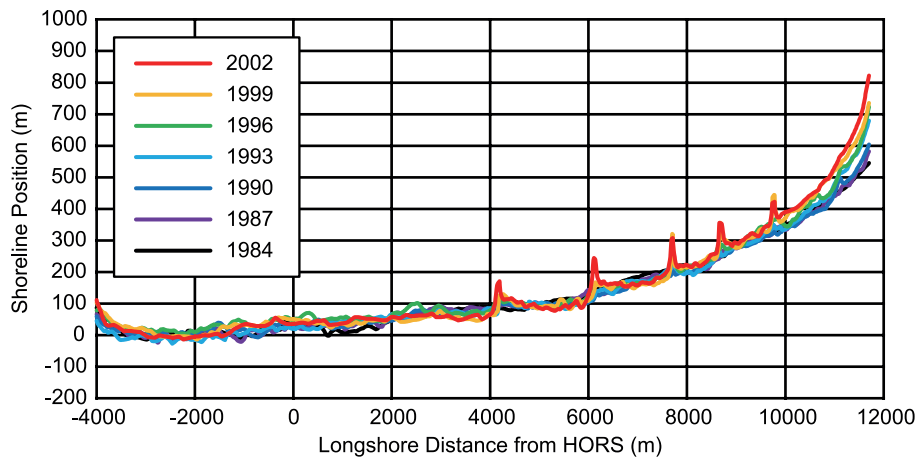
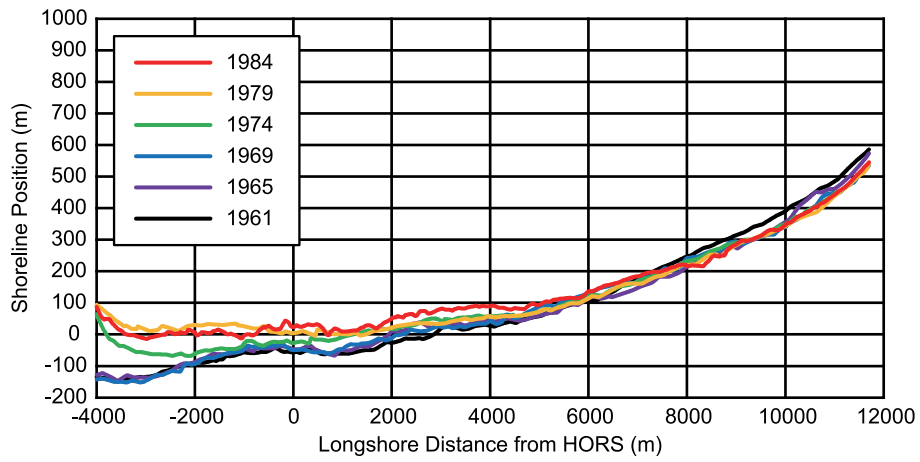


図-11 波崎海岸における汀線位置 (1961年～2013年)

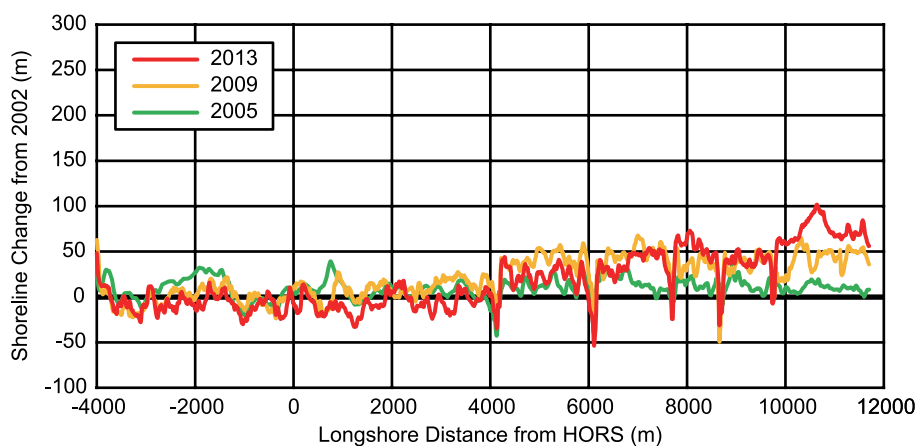
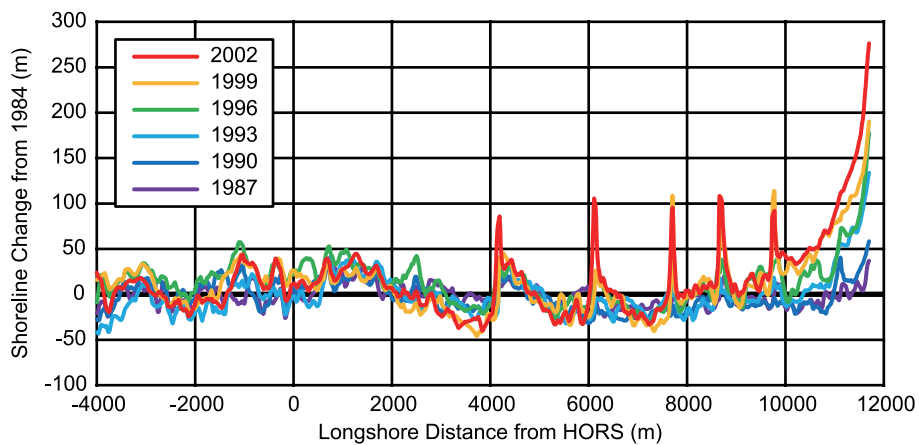
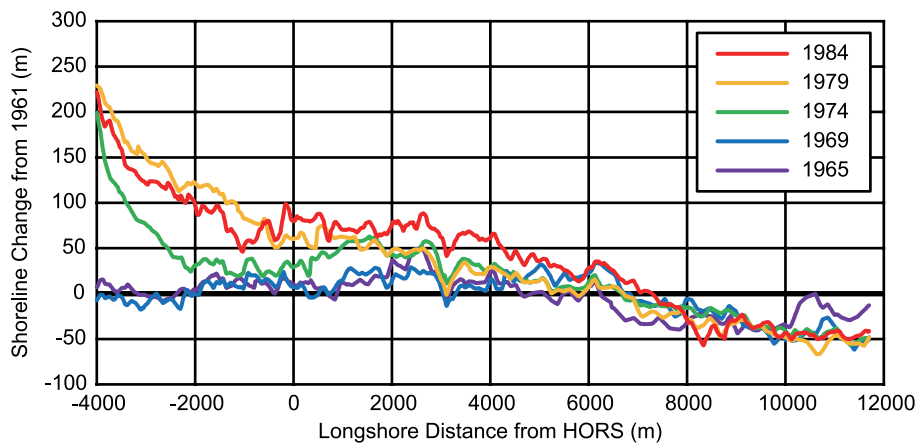


図-12 波崎海岸における汀線変動（上段：1961年の汀線位置を基準とした1961年～1984年の汀線変動，中段：1984年の汀線位置を基準とした1984年～2002年の汀線変動，下段：2002年の汀線位置を基準とした2002年～2013年の汀線変動）

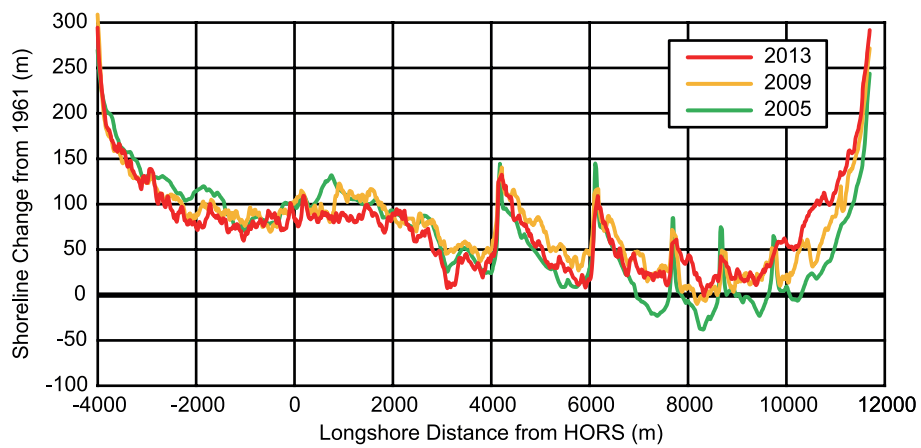
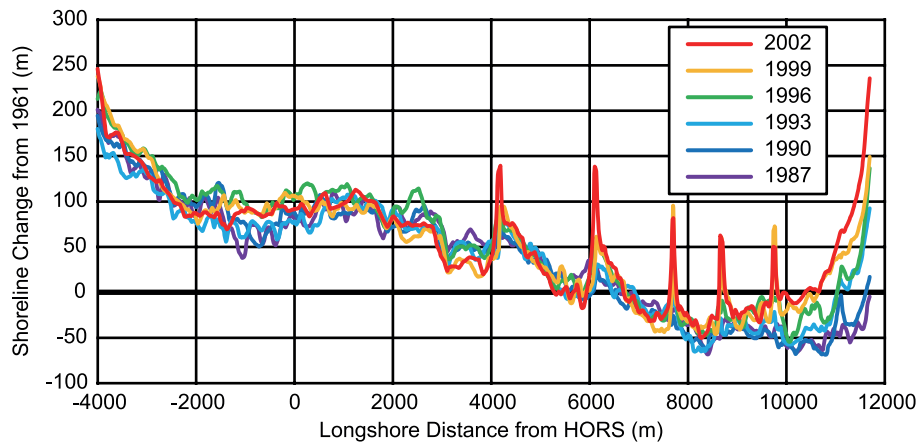
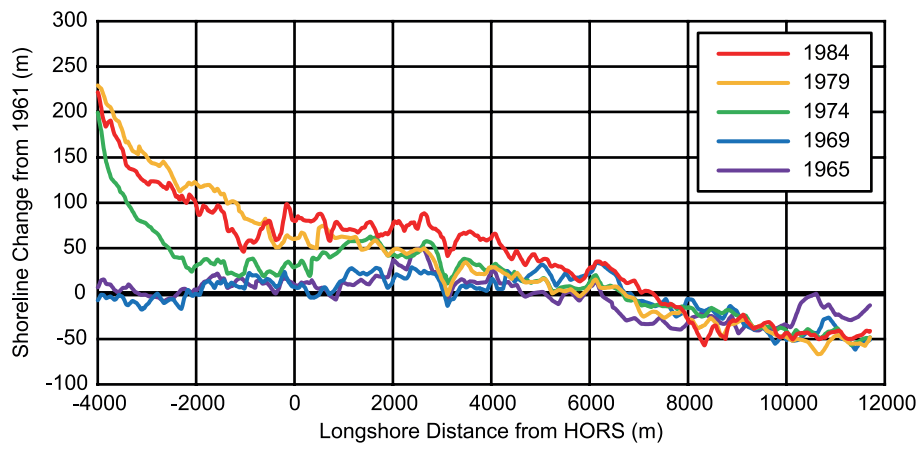


図-13 波崎海岸における汀線変動 (1961年の汀線位置を基準)

のヘッドランド間 ( $x = 4300 \text{ m} \sim 5800 \text{ m}$ ,  $6200 \text{ m} \sim 7400 \text{ m}$ 付近) の汀線がやや後退したが, No.2 ~ No.3のヘッドランド間 ( $x = 7800 \text{ m} \sim 8400 \text{ m}$ ) の汀線がさらに前進した. その結果, 2013年までにはほぼ全域において1961年の汀線位置よりも沖側まで汀線位置が回復した (図-13). NO.1のヘッドランドと波崎漁港の西防波堤の間 ( $x = 10000 \text{ m} \sim 11700 \text{ m}$ 付近) の汀線位置については2002年以降も前進し, 2002年から2013年の間に60 mから100 m程度前進した.

一方で,  $x = 4000 \text{ m}$ より北側の汀線位置の変動は比較的小さく, 2002年から2005年にやや前進し, 2005年以降はゆっくりと後退していく傾向が見られた.

## 5. 汀線の変動特性と変動過程

### 5.1 主要な汀線変動の抽出

#### (1) 解析手法

EOF解析は主成分分析の一つで, 時空間変動データからいくつかの時間と空間の関数を抽出し, データを縮約することでデータに含まれる主要な変動を理解しやすくする手法であり, 汀線変動のような複雑な変動の解析には効果的なものである (例えば, Miller and Dean, 2007a; Miller and Dean, 2007b; Fairley et al., 2009).

EOF解析において, 汀線位置は式(3)のように時間係数と空間関数の積による変動パターンの和として表される.

$$y(x, t) = \sum_n C_n(t) \cdot e_n(x) \quad (3)$$

ここで,  $y(x, t)$ : 汀線位置,  $x$ : 沿岸方向位置,  $t$ : 時間,  $C_n(t)$ : モード $n$ の時間係数,  $e_n(x)$ : モード $n$ の空間関数 (固有関数) である. つまり, EOF解析は汀線変動をいくつかの直交する成分に分けるものであり, 通常, 寄与率の大きい成分の順にモード1, モード2, ... と呼ぶ.

本研究では, 前述した過去50年間 (1961年から2013年) の汀線変動に対し, EOF解析を行うことで, 主要な汀線変動を抽出し, その変動特性を整理した. なお, 本研究では, 海岸全体 ( $x = -4000 \text{ m} \sim 11700 \text{ m}$ ) を対象領域としたEOF解析の他に,  $x = 4000 \text{ m}$ より北側と南側のそれぞれに対象領域を絞ったEOF解析も行った. これにより, 海岸全体を対象とした場合よりも, 海岸の北部及び南部において生じた局所的な汀線変動の特性を明確に捉えることができる. これらの解析は1961年から2013年を解析対象期間としたものである. なお, 前述の三つの各時期 (1961年 ~ 1984年, 1984年 ~ 2002年, 2002年 ~ 2013年) に解析対象期間を限定した解析も行ったが, 上述の解析

から得られた変動特性以外の情報を見出すことはできなかった (付録E 図-E.1, 図-E.2, 図-E.3).

#### (2) 変動特性 (海岸全体の解析)

海岸全体を対象領域としたEOF解析 (図-14) において, 寄与率はモード1が65%, モード2が26%であり, モード1とモード2のみで波崎海岸の汀線変動をほぼ説明できる. モード1の空間関数は海岸のほぼ全域において正の値であり, 時間係数は大局的には増加の傾向が見られた. つまり, モード1は海岸全体の汀線の前進傾向を表すものであり, 1969年から1979年, 1993年から1996年において汀線は海岸全体で比較的大きく前進傾向にあり, 1999年から2009年において汀線は比較的緩やかな前進傾向にあったことを示している. とりわけ, モード1の空間関数の値は海岸の両端やヘッドランドの南側にかけて大きく, そのような場所において汀線が特に大きく前進したことを示している.

一方, モード2の空間関数は海岸北部で正の値であり,  $x = 4000 \text{ m}$ 付近を境に海岸南部で負の値となっている. すなわち, モード1が海岸全体の汀線の前進傾向を表すのに対し, モード2は海岸北部と南部における局所的な汀線の変動を表すものである. モード2の時間係数は, 1961年から1979年において増加しており, 海岸北部における汀線の前進と海岸南部における汀線の後退を表す. つまり, モード2は, モード1による土砂の海洋投入直後の海岸北部における汀線位置の大幅な前進を補足すると同時に, モード1で表されるヘッドランド周辺や波崎漁港西防波堤近傍における汀線の前進を建設以前においてキャンセルしていると考えられる. その後, モード2の時間係数は1990年までほとんど変化しなかったが, 1990年以降は減少傾向に転じた. この時間係数の減少は前述とは逆の傾向で, 海岸北部における汀線の後退と海岸南部 (ヘッドランド間や波崎漁港の西防波堤近傍) における汀線の前進を表している.

本解析から得られた汀線の変動特性をまとめると, 土砂の海洋投入以降, 海岸全体の汀線は前進傾向にあり, その前進は1969年から1979年には海岸北部を中心に生じ, 1990年以降には海岸南部を中心に生じたと考えられる. これらの前進傾向は後述の海岸北部および南部に解析対象領域を限定した解析によっても明確に見出された.

#### (3) 変動特性 (海岸北部の解析)

海岸北部 ( $x = 4000 \text{ m}$ より北側) のみを対象としたEOF解析 (図-15) において, 寄与率はモード1が91%, モード2が3%であり, モード1で海岸北部の汀線変動をほぼ全て説明できる. モード1の空間関数は対象領域の全域で正の値であり, 北ほどその値は大きかった. モード1の時間

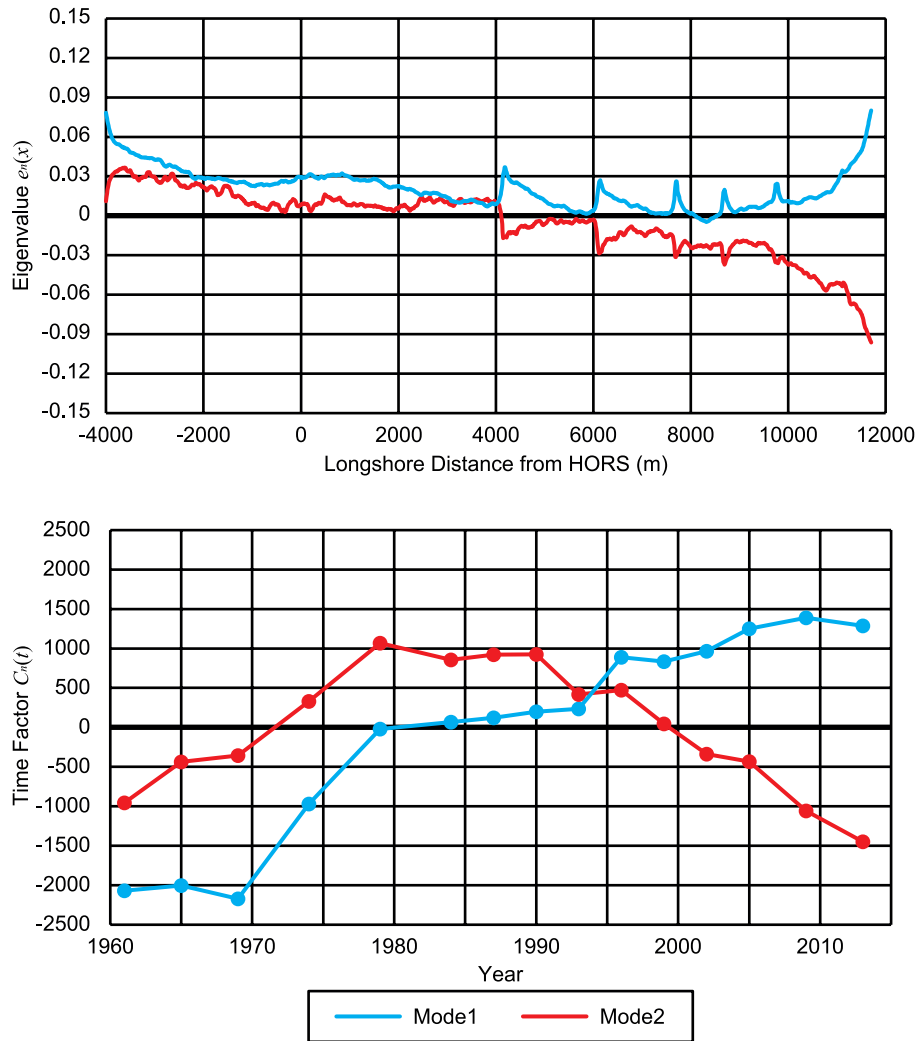


図-14 海岸全体の汀線変動に対するEOF解析結果（上段：空間関数，下段：時間係数）

係数は1969年から1979年に最も増加していることから、モード1は1969年から1979年の海岸北端をピークとした汀線の前進を表し、これが海岸北部における最も特徴的な変動特性として挙げられる。また、モード1の時間係数は1993年から1996年に増加したが、1996年以降、増減を繰り返しながら減少し、2013年の値は1990年とほぼ同じ値まで減少した。このことから、モード1は、上述の海岸北部における1969年から1979年の汀線の前進に加え、1993年から1996年における一時的な海岸全域での汀線の前進と、その後の緩やかな汀線の後退を表している。

一方、モード2は寄与率が小さく、時間係数についてもモード1と比較して変動が非常に小さく、ほとんどが0付近で推移していたものの、1979年のみ時間係数が-500以下まで一時的に減少した。また、モード2の空間関数は $x = -1000$  m付近を境に正負が異なった。すなわち、モード1の汀線変動と併せて考えると、モード2は、1974年から1979年には $x = -1000$  mより北側で汀線の前進が一時的

に集中し、1979年から1984年には $x = -1000$  mより北側で汀線の後退が生じ、 $x = -1000$  mより南側で汀線の前進が生じたことを表している。また、モード2の空間関数の空間平均は正の値であった。つまり、モード2は1974年から1979年に汀線を空間平均的には後退させることから、1974年から1979年における実際の汀線の前進は、モード1で表される前進と比較して空間平均的には小さかったと考えられる。また、1984年にはモード2の時間係数の値が1974年とほぼ同じ値まで戻ったことから、モード2は1979年から1984年に汀線を前進させ、結果的に、1969年から1984年の海岸北部では汀線の大幅な前進傾向が生じた。

#### (4) 変動特性（海岸南部の解析）

海岸南部（ $x = 4000$  mより南側）のみを対象としたEOF解析（図-16）において、寄与率はモード1が82%、モード2が9%であり、海岸北部同様にモード1で海岸南部の汀線変動をほぼ説明できる。モード1の空間関数は対象領域の全域で負の値であり、特にヘッドランド南側や波崎漁



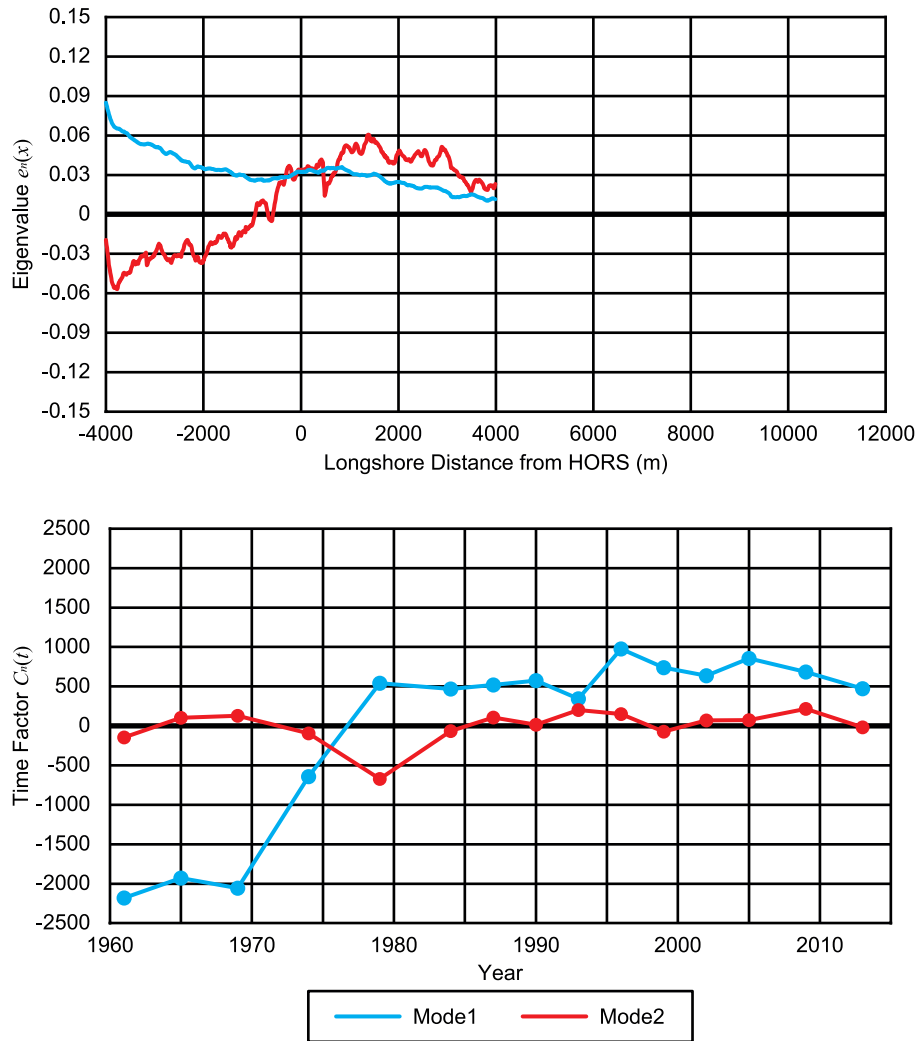


図-15 海岸北部の汀線変動に対するEOF解析結果（上段：空間関数，下段：時間係数）

港西防波堤近傍においてその絶対値が大きかった。モード1の時間係数は1990年までは大きな変化はないが、1990年以降単調に減少していたことから、モード1は1990年以降のヘッドランド南側や波崎漁港西防波堤近傍を中心とした汀線の前進を表し、これが海岸南部における最も特徴的な傾向の一つとして挙げられる。

一方、モード2の寄与率は小さいものの、時間係数にわずかながら特徴的な傾向が見られた。モード2の時間係数は1961年から1993年まで緩やかに増加傾向にあり、1993年に最大となった。1993年から2002年までのモード2の時間係数の変動はわずかであったが、2002年以降は減少し続け、2013年のモード2の時間係数は1965年の値よりも小さくなった。つまり、モード2は、空間関数が負の値である領域（ $x = 5500 \text{ m} \sim 11000 \text{ m}$ 付近）における1993年までの汀線の後退傾向を表すと同時に、2002年以降に後退した汀線が回復する傾向を表す。モード1と併せて考えると、モード2は、1990年以降に見られた海岸南部の領域にお

ける汀線の回復傾向が、1993年と2002年以降に順次、強くなっていったことを示している。

## 5.2 土砂量バランスと変動要因

海岸全体の土砂量のバランスにより、汀線変動を引き起こした要因を検討するために、解析対象領域全体（ $x = -4000 \text{ m} \sim 11700 \text{ m}$ ）の平均汀線位置を求めた（図-17）。平均汀線位置に変化がない場合、沿岸方向で土砂の量的バランスが取れていることから、その期間の空間的な汀線変動は沿岸漂砂によって生じていると考えることができる。一方で、平均汀線位置の前進は、沿岸漂砂だけでなく、漂砂系内の土砂量の増加や海岸全体で沖から岸近くへの土砂の移動（岸沖漂砂）によって生じていると考えることができる。なお、漂砂系内の土砂量の増加は、河川供給土砂量の増加や土砂の海洋投入、沿岸漂砂による漂砂系境界部からの流入などによって引き起こされる。

1961年から1969年、1984年から1993年、1996年から

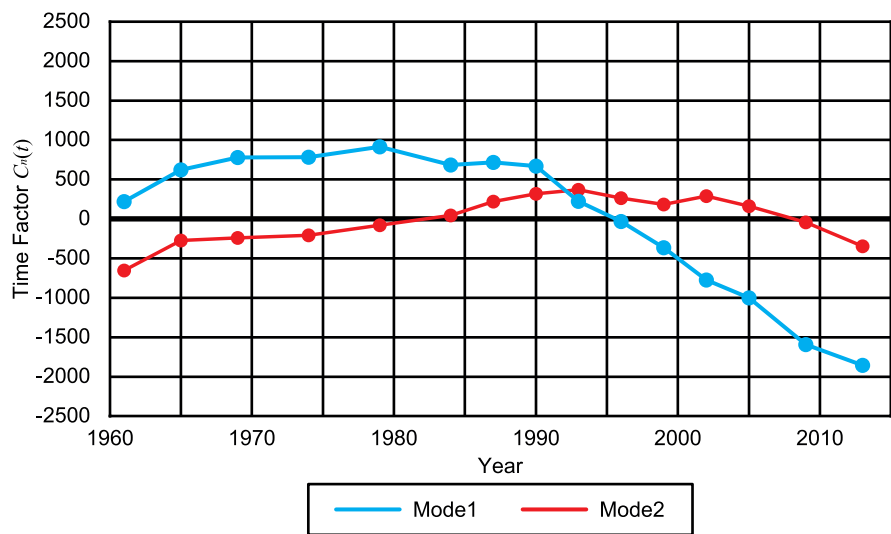
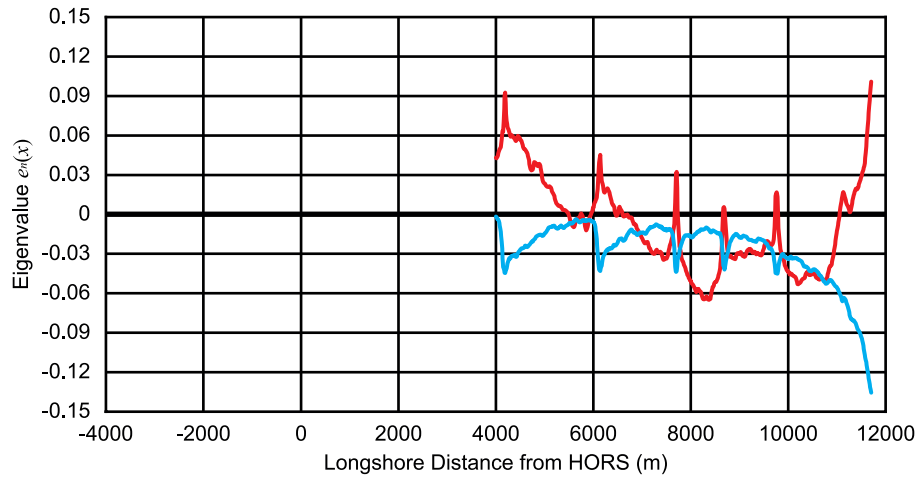


図-16 海岸南部の汀線変動に対するEOF解析結果（上段：空間関数，下段：時間係数）

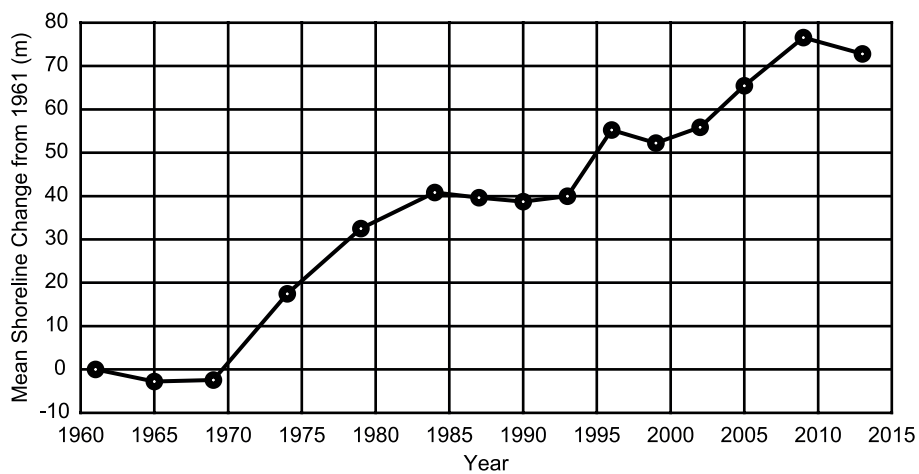


図-17 波崎海岸の平均汀線位置の経時変化（1961年の汀線位置を基準）

1999年、2009年から2013年の平均汀線位置の変化は小さく、この時期の局所的な汀線変動は主に沿岸漂砂によって引き起こされたものと考えられる。

一方で、1969年から1984年、1993年から1996年、1999年から2009年において、平均汀線位置は大きく前進した。1969年から1984年までの平均汀線位置の前進量は約43 mであり、1993年から2009年までをまとめた平均汀線位置の前進量は約37 mであった。結果として、2009年の海岸全体の平均汀線位置は1961年より約77 m前進した。つまり、これらの時期の汀線変動は沿岸漂砂のみならず、漂砂系内の土砂量の増加や岸向きの土砂移動が影響していたと考えられる。

これらの汀線の前進が岸沖漂砂によるものではなく、漂砂系内の土砂量の増加によるものと仮定し、漂砂の移動高約7 m (宇多, 1997) を用い、移動限界水深 (約8 m) 以浅からバーム頂部 (高さ約3 m) までに堆積した土砂量として換算すると、1969年から1984年までの堆積量が約480万 m<sup>3</sup>、1993年から2009年までの堆積量が約400万 m<sup>3</sup>となる。これらの推定された堆積土砂量に加え、1965年から1977年にかけて海洋投入された土砂量 (地形変化寄与分) が約2700万 m<sup>3</sup>であったことを考慮すると、1969年から1984年の平均汀線位置の前進については、土砂の海洋投入によって漂砂系内の土砂量が増加したことが主要因であると推察される。実際に、波崎海岸の海洋投入土砂による地形変化に関する先行研究として、佐藤ら (1974) は1960年代前半から1970年代前半までの地形変化を整理し、土砂の海洋投入によって大規模な地形変化が生じたことを報告している。また、2010年に行われた海底底質コアサンプリングによって、波崎海岸沖 (水深9 mから水深19 m付近) に、この海洋投入土砂の堆積履歴が投入から50年経過後においても残っていることが示されており (伴野ら, 2013)、土砂の海洋投入が波崎海岸の地形変化に比較的大きな影響を与えたことが示されている。

一方で、1993年から2009年の平均汀線位置の前進は、土砂の海洋投入から15年以上経過していることに加え、1984年まで土砂の海洋投入の影響と考えられる汀線の前進が一度収束していることから、土砂の海洋投入によって漂砂系内の土砂量が増加したことによるものとは考えにくい。別の土砂供給源 (利根川からの供給土砂やヘッドランド間の養浜) や岸沖漂砂による土砂の岸向き移動が要因として挙げられる。

そこで、1984年以降に生じた土砂の移動過程を詳細に検討するために、茨城県により実施された1984年、2000年、2009年の深淺測量をもとに、1984年から2000年、2000年から2009年の地形変化を求めた (図-18)。なお、茨城県

により実施された深淺測量は本研究における解析対象区間 (沿岸方向) の全域を含み、岸沖方向は岸から1.5 km程度の範囲 (高さ約5 mから約15 m) で実施されたものである。1984年から2000年の地形変化は水深約4 m以深の土砂がそれ以浅に移動したことを示しており、この時期の平均汀線位置の前進が主に海岸全域での土砂の岸向き移動によって引き起こされたものであると推察される。

2000年から2009年の地形変化については、水深約2 mから8 mの土砂がその岸沖方向に移動したと考えられ、1984年から2000年に土砂が移動した水深帯とは異なるものの、いずれも岸沖漂砂による土砂移動が生じていたと考えられる。なお、1984年から2000年の岸近くの土砂の堆積は海岸全域で生じたのに対し、2000年から2009年の岸近くの土砂の堆積は特にヘッドランド間などの海岸南部において顕著であり、海岸北部ではわずかだった。つまり、2000年以降の汀線の前進は、土砂の岸向き移動と海岸南部での顕著な堆積によって引き起こされたものであると推察される。これらの長期的な岸沖漂砂による地形変化が生じた原因は本研究においては明らかとなっていないものの、この時期の波浪条件などが上述したような岸向きの土砂移動を引き起こしやすいものであったと推察される。

また、1984年から2009年の地形変化から領域内の総土砂量は増加していないことから、1993年以降の平均汀線位置の前進は、利根川からの供給土砂量 (約5万 m<sup>3</sup>/year以上) やヘッドランド間の養浜量 (約13万 m<sup>3</sup>) などによって漂砂系内の総土砂量が増加したことが主要因ではないと考えられる。ただし、鹿島港南海浜護岸付近や波崎漁港西防波堤付近 (それぞれ、 $x = -4000$  m付近、 $x = 10000$  mより南側) においては、上述した岸沖方向の土砂移動とは別の堆積が生じており、これらは沿岸漂砂の捕捉によるものと考えられるが、特に波崎漁港西防波堤付近ではその量が大きいことから、波崎漁港周辺の局所的な堆積には利根川からの河川供給による寄与もあると考えられる。なお、宇多ら (2007) は1984年から2006年の海岸全体の汀線変化をもとに、海浜の総土砂量の変化を求め、利根川からの供給土砂量を前述の波崎漁港沖に堆積した年間約5万 m<sup>3</sup>と合わせて年間約10万 m<sup>3</sup>と見積もっているが、本研究における検討結果に基づくと、1984年以降の汀線の前進は主として岸沖漂砂によって生じていると考えられることから、汀線の前進量から見積もられた河川からの供給土砂量は過大評価となり得ることに注意が必要である。

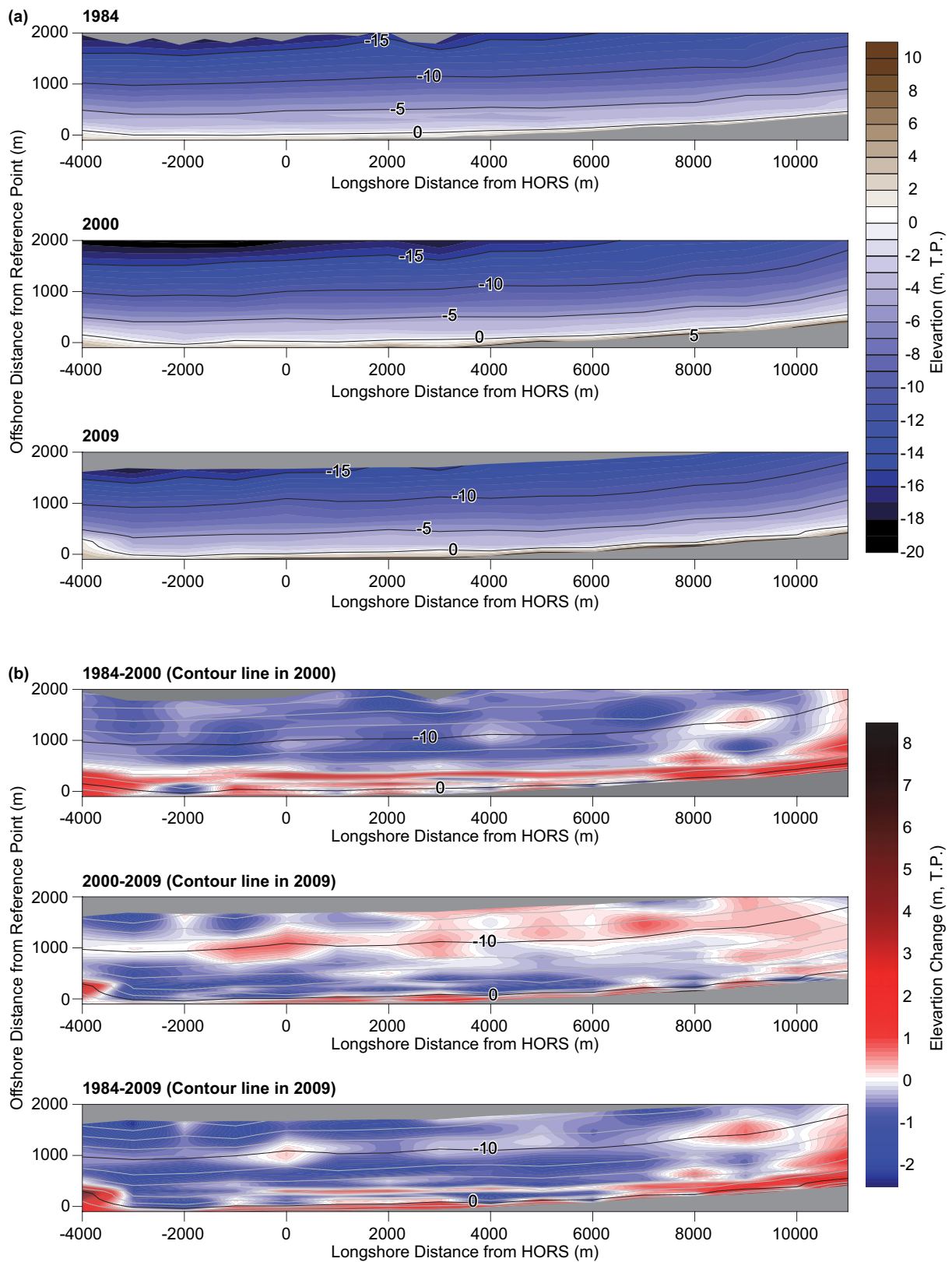


図-18 (a)深浅図 (測量範囲外は灰色で表示, 上段:1984年, 中段:2000年, 下段:2009年)  
 (b)深浅変化 (上段:1984年~2000年, 中段:2000年~2009年, 下段:1984年~2009年)

### 5.3 汀線の変動過程に関する考察

波崎海岸では、土砂の海洋投入に伴う土砂量の増加と岸沖漂砂による土砂移動によって汀線の前進傾向が生じていたことが明らかとなった。一方で、沿岸漂砂による土砂移動も同時に生じていたと考えられ、汀線の変動に空間的なばらつきを生じさせていたと推測される。本節では、前節までに得られた汀線変動特性とその要因を整理し、各時期の汀線の変動過程について考察した。

1961年から1969年においては、構造物や土砂の海洋投入などの人為的影響が小さい自然状態にあり、北向きの沿岸漂砂により、 $x = 6000$  mより南側で汀線の後退が生じたと同時に、土砂が北へ運ばれたことによって $x = -2000$  m ~  $6000$  m付近において汀線が前進した。

1969年から1984年においては土砂の海洋投入により漂砂系内の土砂量が増加すると同時に、鹿島港南海浜護岸が北向きの沿岸漂砂を捕捉したことによって、海岸北部を中心とした汀線の前進が生じた。

1984年から1993年においては、波崎漁港の東防波堤および西防波堤の建設とともに海岸南端付近において波の遮蔽域が形成され、遮蔽域に回りこむ循環流が生じ、岸近くでは南向きの流れとともに土砂が移動し、汀線がわずかに前進した。一方で、そこから少し北側に離れた $x = 5500$  m ~  $11000$  m付近では、上述の南向きの土砂移動の上手側であるとともに、北向きの沿岸漂砂が卓越して生じたことによって、汀線の後退が深刻になった。同時に、ヘッドランドの建設が開始されたことで、北向きの沿岸漂砂の上手側であるヘッドランド南側では汀線は前進したものの、下手側となるヘッドランド北側においては、より一層汀線の後退が深刻となった。

その後、何らかの要因によって沖から岸方向への土砂の移動が生じたことで、1993年から1996年には海岸全体で汀線が前進した。1996年以降においては、海岸北部の汀線は緩やかに後退したものの、海岸南部の汀線は前進傾向が引き続き生じ、特にヘッドランドが完成した2002年以降には、汀線の前進傾向が強まった。この海岸南部を中心とした汀線の前進は、前述の沖から岸側への土砂移動と同時に、沖と岸との沿岸流の卓越方向の違いによる影響が寄与していると推察される。具体的には、波崎海岸では、沖では南向き、汀線付近では北向きの沿岸流が卓越することから、漂砂系内を半閉鎖的な場として考えると、その沿岸流の卓越方向の違いを補償する流れとして海岸南部では岸向き、海岸北部では沖向きの流れとそれに伴った土砂移動が生じやすいと考えられる。つまり、海岸全体で大きな時計回りの流れの循環が生じていた可能性があり、海岸南部に建設されたヘッドランドに

よって岸近くの北向きの沿岸漂砂が遮断されたことで、ヘッドランド間や海岸南端周辺で汀線は前進し、漂砂の下手に当たる海岸北部で緩やかに汀線は後退していったと考えられる。なお、この時計回りの漂砂循環は等深線変化モデルを用いた宇多ら（2008）の検討結果とも一致するものである。

## 6. おわりに

本研究では、茨城県波崎海岸における1961年から2013年の航空写真から汀線位置を用い、約50年間の波崎海岸全体の汀線変動の実態を俯瞰的に把握し、EOF解析を用いることで、その変動特性を整理し、その変動を引き起こした要因と変動過程について考察した。

その結果、波崎海岸では過去に長期的な汀線の前進傾向が生じていたことが明らかとなり、同時に北向きの沿岸漂砂による汀線変動が生じていたことが示された。第一の前進傾向は、土砂の海洋投入直後の1969年から1984年に生じた海岸北部を中心とした汀線の前進であり、海岸北端では200 m以上汀線が前進し、海岸全体の平均汀線位置は15年間で約43 m前進した。第二の前進傾向は、上述の汀線の前進が一度収束してから約10年が経過した1993年以降に生じた汀線の前進であり、1993年から1996年には海岸全域で生じ、1996年以降は海岸南部を中心として生じた。これにより、1993年から2009年の16年間で平均汀線位置は約37 m前進した。

1969年から1984年の汀線の前進は、土砂の海洋投入により漂砂系内の土砂量が増加したことによるものと考えられ、1993年以降の汀線の前進は主に沖から岸に土砂が移動したことによるものと考えられた。特に、2002年以降の汀線の前進はヘッドランドおよび波崎漁港西防波堤周辺において顕著であり、これは岸近くで卓越する北向きの沿岸漂砂がヘッドランドによって捕捉されたためであると考えられた。

通常、数日から数週間程度の比較的短期の地形変化は主として岸沖漂砂によって生じることが多く、突堤や防波堤などの構造物の建設に伴った数ヶ月から数年程度の比較的長期の地形変化は沿岸漂砂によって生じることが多いと言われてきた。しかしながら、本結果は長期的な海浜地形変化において岸沖漂砂が大きく寄与する可能性があることを示しており、長期的な地形変化を予測する上で岸沖漂砂の影響を十分に考慮する必要であると考えられる。しかしながら、本研究においては沖から岸へ土砂が移動したメカニズムを十分に明らかにすることはできず、今後そのメカニズムを明らかにしていく必要

がある。

## 謝辞

本研究の一部はJSPS科研費（課題番号：25820235）の助成を受けたものである。本研究における一部の航空写真、深浅測量結果、ヘッドランドの建設履歴情報の利用に関して茨城県河川課の協力を得た。また、鹿島港の建設履歴については国土交通省鹿島港湾・空港整備事務所から情報提供いただき、波崎漁港の建設履歴については茨城県水産振興課から情報提供いただいた。深浅測量データの整理の一部は、上岡智志氏（元・漂砂研究室、現・国土交通省中部地方整備局）により行われたものである。ここに記し、感謝の意を表す。また、HORSの沿岸流データは波崎海洋研究施設において長きにわたり実施された現地観測による成果であり、観測に携わった全ての観測者に対し、深い謝意を表す。

## 参考文献

- 宇多高明・藤崎太郎・山本幸次・小田切健史（1993）：徳島県今津坂野海岸の侵食実態，海岸工学論文集，第40巻，pp.446-450.
- 宇多高明・川森晃・若林隆司（1994）：北海道野付崎の海岸侵食とその対策，海岸工学論文集，第41巻，pp.521-525.
- 宇多高明（1997）：日本の海岸侵食，山海堂，442p.
- 宇多高明・勝山均・松浦健郎・熊田貴之・長山英樹・大木康弘（2007）：利根川からの土砂流入のある波崎漁港周辺の海浜変形の実態と予測，海岸工学論文集，第54巻，pp.586-590.
- 宇多高明・熊田貴之・芹沢真澄・長山英樹（2008）：波向変動場で生じる漂砂大循環の発生メカニズム，海岸工学論文集，第55巻，pp.506-510.
- 運輸省第二港湾建設局鹿島港工事事務所（1983）：巨大人工港の建設—鹿島港の20年—，p.185.
- 加藤一正・柳嶋慎一・磯上知良・村上裕幸（1989）：波による汀線付近の水位上昇量—波崎海洋研究施設における現地観測—，港湾技術研究所報告，Vol.28，No.1，pp.3-41.
- 関東地方整備局鹿島港湾・空港整備事務所（2011）：鹿島港潮位表，鹿島港基準面関係図.
- 栗山善昭（2001）：沿岸砂州の長期変動特性と底質移動特性，土木学会論文集，No.677，pp.115-128.
- 斉藤晴雄・宇多高明・綱田政芳・沢田善治・林秀治（1985）：小川原湖海岸の海岸侵食とその予測，海岸工学講演会論文集，第32巻，pp.380-384.
- 佐藤昭二・田中則男（1962）：水平床における波による砂移動について，第9回海岸工学講演会講演集，pp.95-100.
- 佐藤昭二・田中則男・佐々木克博（1974）：鹿島港建設に伴う海底地形の変化について—事例研究—，港湾技術研究所報告，Vol.13，No.4(2)，pp.3-78.
- 佐藤慎司・前田亮・磯部雅彦・関本恒浩・笠井雅広・鳥居謙一・山本幸次（2000）：鹿島灘南部海岸の地形形成機構に関する現地調査，土木学会論文集，No.663/II-53，pp.89-99.
- 関寺将司・小林昭男・宇多高明・野志保仁（2015）：波崎海岸のポケットビーチ化に伴う海浜変形の実態，土木学会論文集B3（海洋開発），Vol.71，NO.2，印刷中.
- 滝沢俊二・宇多高明・堤博志（1987）：蒲原海岸の海岸侵食実態，海岸工学講演会論文集，第34巻，pp.347-351.
- 田中則男・小笹博昭・小笠原昭（1973）：海浜変形調査資料（第一報）—航空写真による汀線変化の解析（東日本編）—，港湾技術研究所資料，No.163，95p.
- 永井紀彦（2002）：全国港湾海洋波浪観測30か年統計（NOWPHAS 1970-1999），港湾空港技術研究所資料，No.1035，388p.
- 長島郁夫・岩崎伸昭・宇多高明・有村盾一（2005）：遠州灘海岸の天竜川河口以西の侵食実態，海岸工学論文集，第52巻，pp.596-600.
- 伴野雅之・清家弘治・小松原純子・栗山善昭（2013）：放射性炭素年代測定を用いた海底土砂の長期的移動・堆積履歴の推定，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.69，No.2，pp.I\_686-I\_690.
- 安本善征・宇多高明・松原雄平（2006）：鳥取沿岸の侵食実態と総合的な土砂管理の検討—千代川右岸流砂系の例—，海岸工学論文集，第53巻，pp.641-645.
- 柳嶋慎一・中村聡志・伴野雅之（2012）：平成23年東北地方太平洋沖地震による津波の遡上と地形および底質粒径の変化—波崎海洋研究施設における現地調査—，港湾空港技術研究所資料，No.1261，54p.
- Fairley, I., Davidson, M., Kingston, K., Dolphin, T. and Phillips, R. (2009): Empirical orthogonal function analysis of shoreline changes behind two different designs of detached breakwaters, Coastal Engineering, Vol.56, No.11-12, pp.1097-1108.
- Kuriyama, Y., Ito, Y. and Yanagishima, S. (2008): Cross-shore variation of long-term average longshore current velocity in the nearshore zone, Continental Shelf Research, Vol.28, No.3, pp.491-502.

- Kuriyama, Y. and Sakamoto, H. (2014): Cross-shore distribution of long-term average longshore sediment transport rate on a sandy beach exposed to waves with various directionalities, *Coastal Engineering*, Vol.86, pp.27-35.
- Miller, J. K. and Dean, R. G. (2007a): Shoreline variability via empirical orthogonal function analysis: Part I temporal and spatial characteristics, *Coastal Engineering*, Vol.54, No.2, pp.111-131.
- Miller, J. K. and Dean, R. G. (2007b): Shoreline variability via empirical orthogonal function analysis: Part II relationship to nearshore conditions, *Coastal Engineering*, Vol.54, No.2, pp.133-150.

付録A 防波堤およびヘッドランドの建設延長

表-A. 1に鹿島港南防波堤および西防波堤, 表-B. 2に波崎漁港西防波堤および東防波堤, 表-B. 3に各ヘッドランドの建設延長をそれぞれ示す.

表-A. 1 鹿島港南防波堤および南海浜護岸の建設延長

Breakwater Construction History		
Year	Built Length (m)	Total Length (m)
1964	100	100
1965	233	333
1966	377	710
1967	735	1445
1968	570	2015
1969	465	2480
1970	330	2810
1971	570	3380
1972	150	3530
1974	30	3560
1986	30	3590
1987	30	3620
1988	30	3650
1990	30	3680
1991	30	3710
1992	15	3725
1993	15	3740
1994	30	3770
1995	15	3785
1997	15	3800
1998	15	3815
2001	30	3845
2003	15	3860
2004	15	3875
Seawall Construction History		
Year	Built Length (m)	Total Length (m)
1968	1660	1660
1969	400	2060
1971	300	2360
1972	340	2700
1974*	3700	6400

表-A. 2 波崎漁港西防波堤および東防波堤の建設延長

West Breakwater Construction History		
Year	Built Length (m)	Total Length (m)
1989	460	460
1990	150	610
1992	320	930
1993	60	990
1994	30	1020
1996	60	1080
1998	15	1095
1999	15	1110
2001	30	1140
2002	15	1155
2006	15	1170
East Breakwater Construction History		
Year	Built Length (m)	Total Length (m)
1975	146	146
1976	120	266
1977	190	456
1978	127	583
1979	87.76	671
1980	195	866
1981	184.8	1051
1982	135.4	1186
1983	164	1350
1984	120.4	1470
1986	45	1515
1987	75	1590
1988	15	1605
1989	45	1650
1991	45	1695
1993	75	1770
1994	45	1815
1995	15	1830
1997	15	1845
2000	60	1905
2006	15	1920
2007	15	1935
2008	30	1965



表-A.3 各ヘッドランドの建設延長

Headland Construction History					
Built Length (m)					
Year	NO.5	NO.4	NO.3	NO.2	NO.1
1986	30.6	0	0	40.8	50
1987	16.3	0	29	0	0
1988	17.8	22	20	0	0
1989	13.5	30	0	0	0
1990	21.8	0	0	13	19
1991	18.2	0	0	0	27
1992	0	14	20	35.5	0
1993	0	32	31	0	0
1994	16.5	25.3	0	14.1	24.8
1995	0	0	0	34.1	13.5
1996	0	14	0	0	0
1997	0	0	0	0	162.3
1998	0	0	196.8	155.6	0
1999	0	155.8	0	0	0
2000	158.8	0	0	0	0
Total Length (m)					
Year	NO.5	NO.4	NO.3	NO.2	NO.1
1986	30.6	0	0	40.8	50
1987	46.9	0	29	40.8	50
1988	64.7	22	49	40.8	50
1989	78.2	52	49	40.8	50
1990	100	52	49	53.8	69
1991	118.2	52	49	53.8	96
1992	118.2	66	69	89.3	96
1993	118.2	98	100	89.3	96
1994	134.7	123.3	100	103.4	120.8
1995	134.7	123.3	100	137.5	134.3
1996	134.7	137.3	100	137.5	134.3
1997	134.7	137.3	100	137.5	296.6
1998	134.7	137.3	296.8	293.1	296.6
1999	134.7	293.1	296.8	293.1	296.6
2000	293.5	293.1	296.8	293.1	296.6

付録B 航空写真一覧

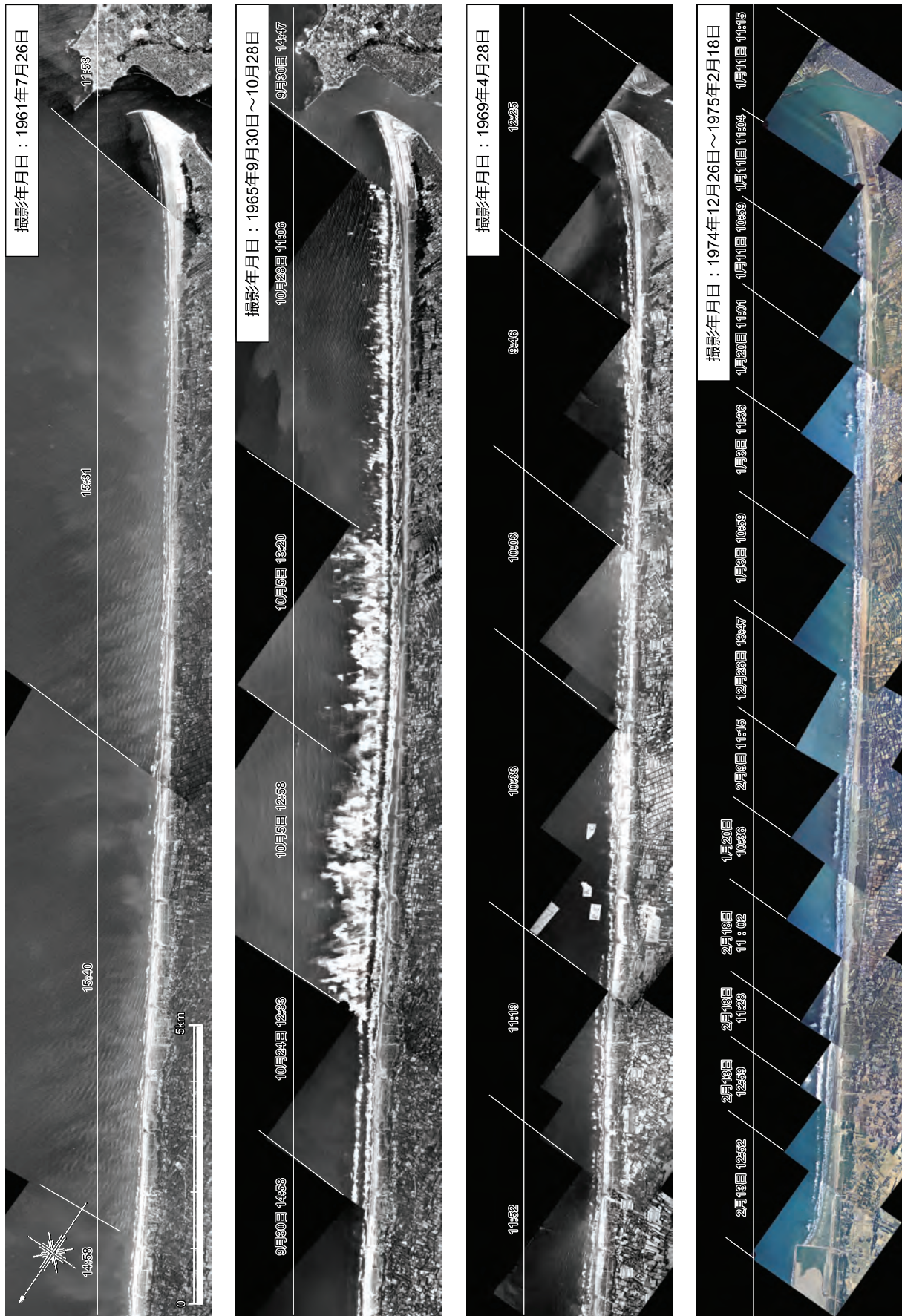


図-B.1 波崎海岸で撮影された航空写真（上から1961年，1965年，1969年，1974年）

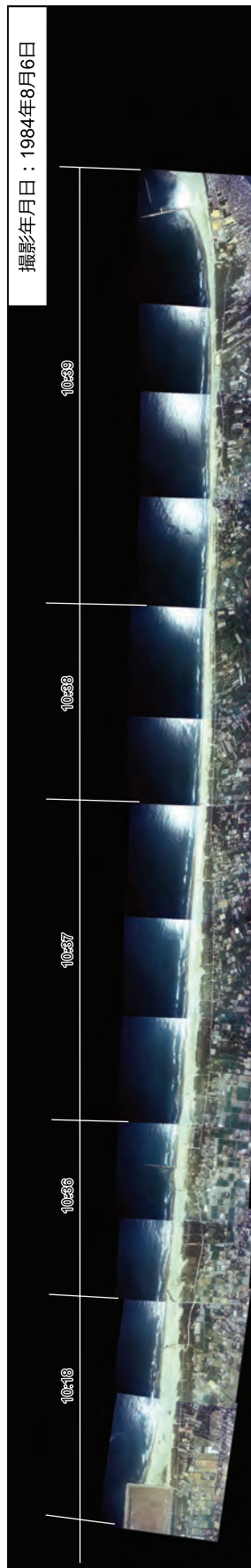
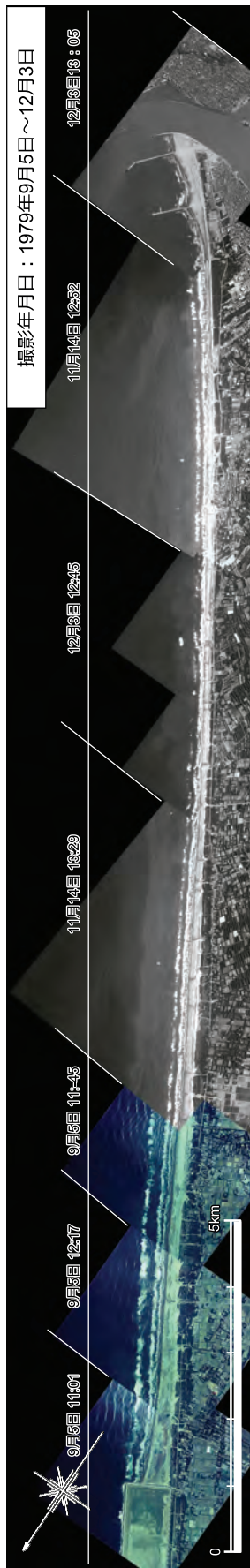


図-B.2 波崎海岸で撮影された航空写真（上から1979年，1984年，1987年，1990年）



図-B.3 波崎海岸で撮影された航空写真（上から1993年，1996年，1999年，2002年）

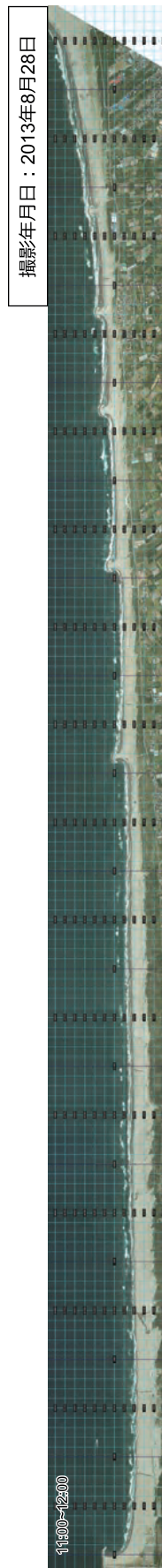
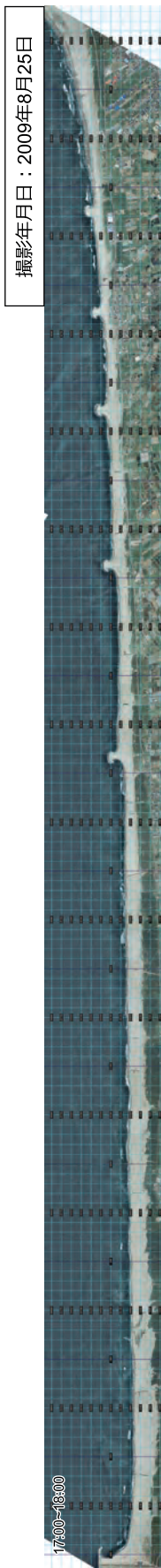
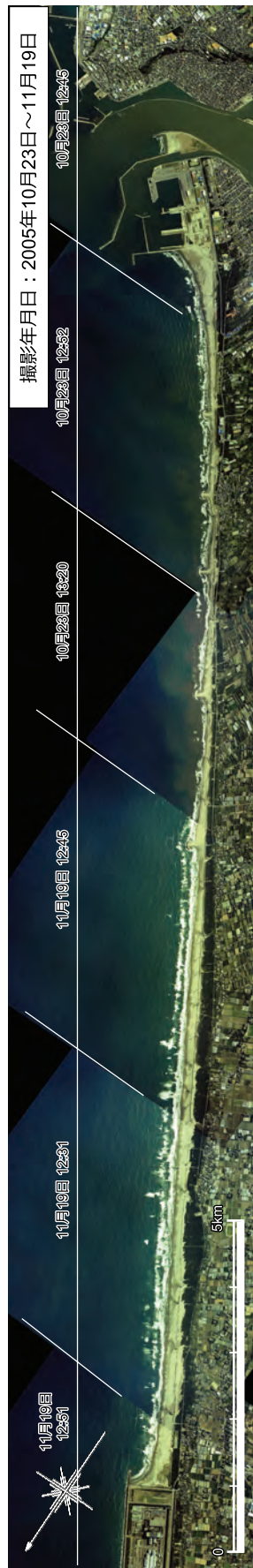


図-B.4 波崎海岸で撮影された航空写真（上から2005年，2009年，2013年）

付録C 航空写真から求めた汀線位置と航空レーザ測量結果に基づく汀線位置の比較

2005年10月23日に撮影された波崎海岸南部の航空写真から求めた汀線位置と同日に行われた航空レーザ測量により求めた汀線位置を比較した。図-C. 1に両者の汀線位置の分布を示し、図-C. 2に両者の汀線位置の相関を示す。

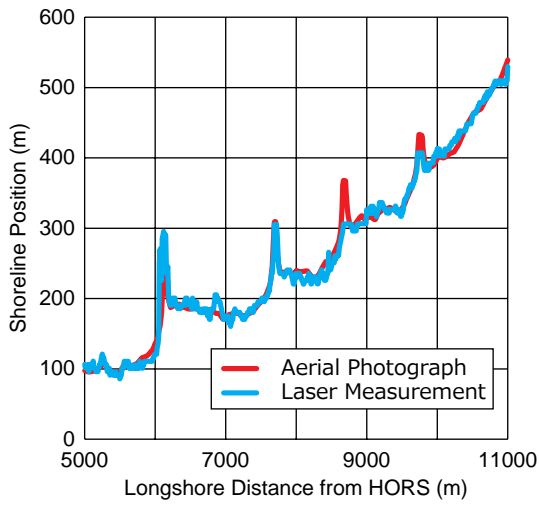


図-C. 1 航空写真から求めた汀線位置と航空レーザ測量により求めた汀線位置の分布

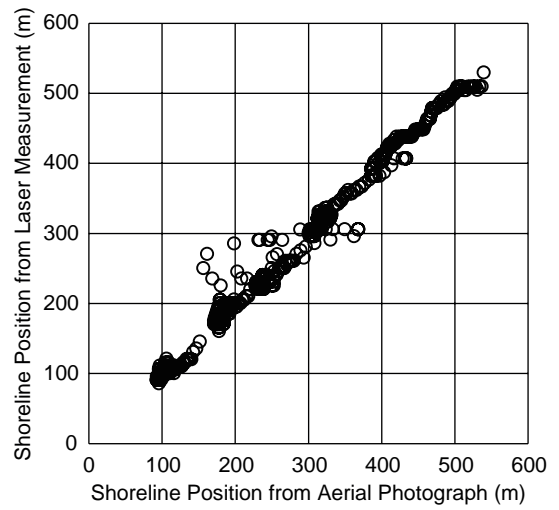


図-C. 2 航空写真から求めた汀線位置と航空レーザ測量により求めた汀線位置の相関

付録D 波崎海洋研究施設で観測された汀線位置の各年における平均値および標準偏差

波崎海洋研究施設において1987年から2010年に休日を除く毎日観測された汀線位置の年平均値および年間の標準偏差を図-D. 1に示す。波崎海洋研究施設における観測は1986年3月より行われているが、1986年は観測期間が1年に満たないこと、2011年以降はデータの取得間隔が週に1回であることを鑑み、ここでは1987年～2010年のデータのみを示す。

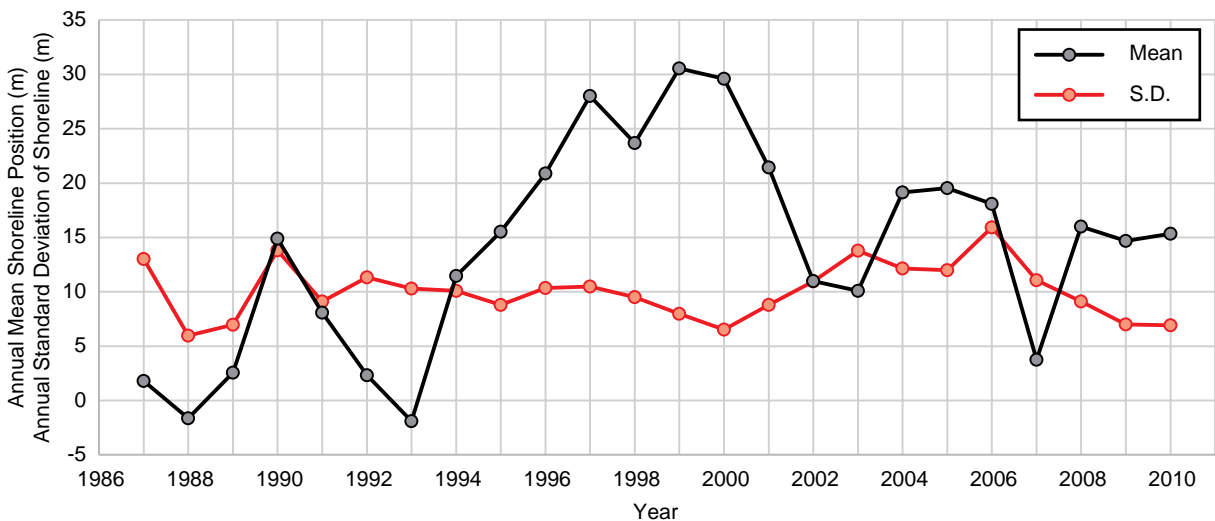


図-D. 1 波崎海洋研究施設で観測された汀線位置の年平均値および標準偏差

付録E 解析対象期間を限定した汀線変動のEOF解析

1961年～1984年, 1984年～2002年のそれぞれの汀線変動に対して, EOF解析を行った結果を図-E. 1, 図-E. 2, 図-E. 3に示す.

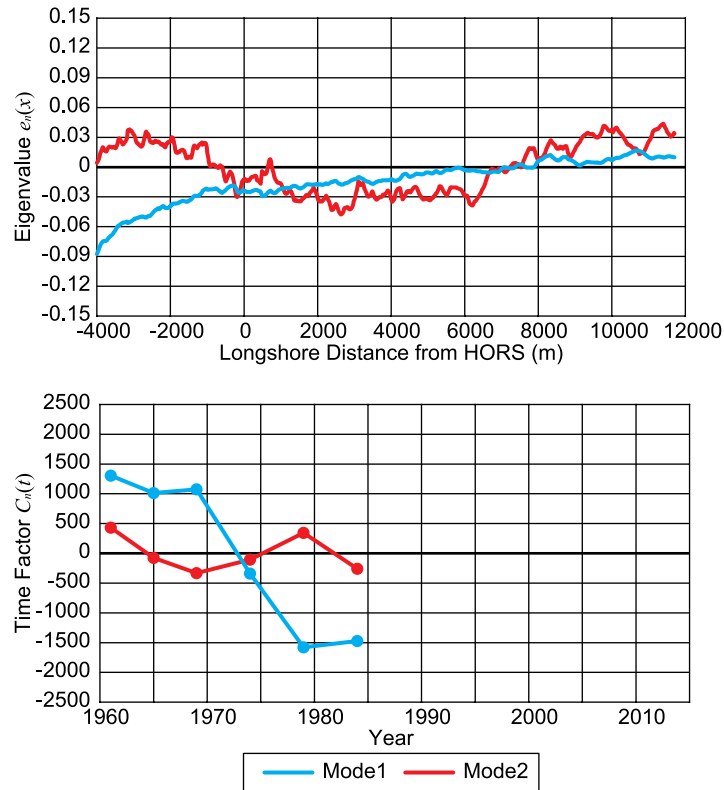


図-E. 1 1961年から1984年の汀線変動に対するEOF解析結果 (上段: 空間関数, 下段: 時間係数)

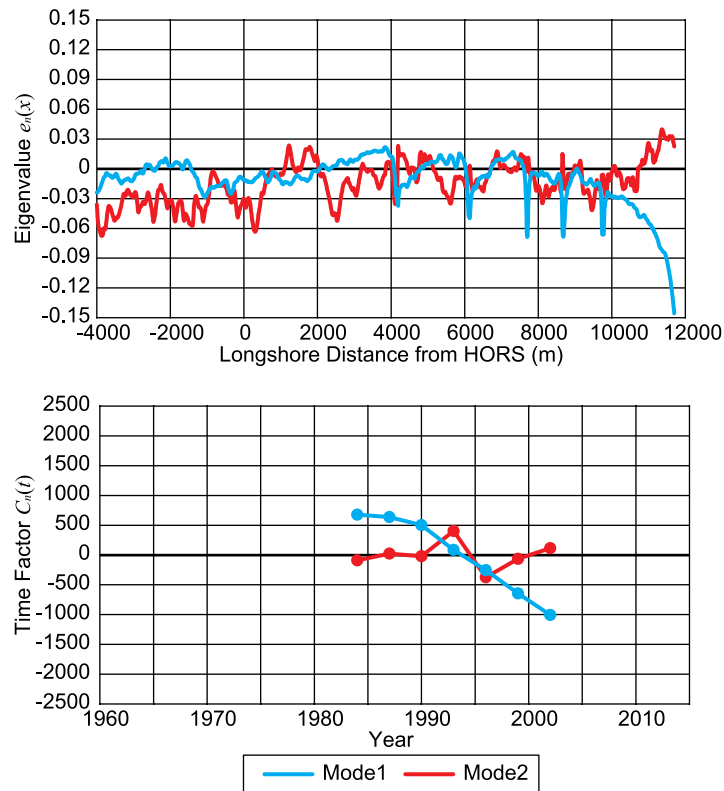


図-E. 2 1984年から2002年の汀線変動に対するEOF解析結果 (上段: 空間関数, 下段: 時間係数)

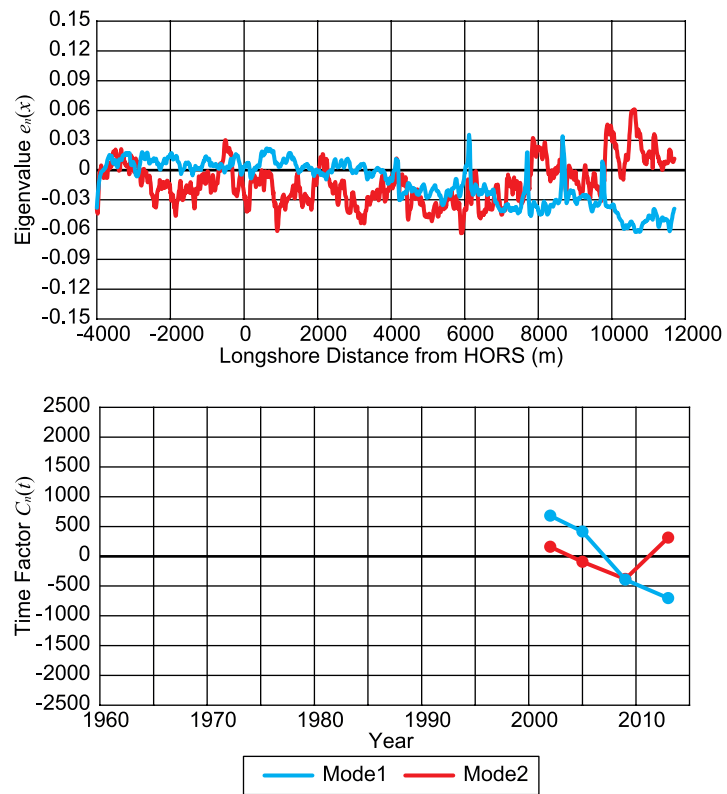


図-E.3 2002年から2013年の汀線変動に対するEOF解析結果（上段：空間関数，下段：時間係数）



港湾空港技術研究所資料 No.1316

2016.3

編集兼発行人 国立研究開発法人 港湾空港技術研究所

発行所 国立研究開発法人 港湾空港技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号  
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社 ワコー

Copyright © (2016) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。