

Cross-shore sediment transport and sediment volume change during systematic migration of multiple sandbars

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-03 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/44387

多段砂州システムの周期的冲向き移動と 岸沖漂砂・土砂量変動の関係 に関する基礎的研究

由比 政年¹・小椋 太智²・松山 正之³

¹正会員 金沢大学教授 環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: yuhi@se.kanazawa-u.ac.jp

²アルテリア・ネットワークス株式会社 (〒108-0023 東京都港区芝浦4-2-8)

³正会員 NPO法人海ロマン21 (〒101-0047 東京都千代田区内神田1-18-11-1011)

E-mail: m-matsuyama@mtb.biglobe.ne.jp

石川県千里浜・高松・七塚海岸に対する深浅測量データを基に、多段砂州の周期的冲向き移動に伴う変動を抽出し、経験的固有関数(EOF)法に基づく解析を行って、砂州移動の固有モードや岸沖漂砂分布、土砂量変動の解析を行った。砂州の形成・移動・消失から成る地形変動は、EOF第1、第2モードの組合せで表現され、両モードが符号を変えつつ交互に支配的となる4つの型を1サイクル間に推移する。対応する岸沖漂砂分布は、地形変動に対する空間固有関数の空間積分と時間固有関数の時間微分の積により規定される。砂州移動に伴い、汀線での土砂輸送も岸向・冲向に周期変化して汀線付近の地盤高が変動する。前浜との土砂授受により断面内土砂量は周期変動を示すが、1サイクル経過すると元の状態に戻り、土砂量の長期変動には寄与しない。

Key Words : sandbar, migration, cross-shore sediment transport, sediment volume, shoreline

1. 序論

国内外の数地点において、多段砂州の形成・冲向き移動・消失という一連のサイクルが数年程度の周期で繰り返されることが報告されている¹⁾²⁾。この種の沿岸砂州の時空間変動は、外浜の中長期地形変化を特徴付けることに加え、前浜・後浜の地形変化や沿岸生態系とも密接な関連を有する。これまでも、多段砂州の組織的移動に関する研究は国内外で広く進められてきたが、岸沖漂砂移動と関連したその内部機構や外部環境の影響、前浜・後浜との相互作用など未解明な点も多い。

石川県千里浜およびその周辺海岸においても、大規模な沿岸砂州が発達し、数年程度の時間スケールで周期的冲向き移動を繰り返している³⁾。千里浜海岸は、地域の重要な観光資源として、砂浜での一般車両走行が可能な「なぎさドライブウェイ」を有しており、ドライブウェイを中長期的に維持・管理するためにも、砂浜幅や海浜土砂量の確保が必須である。この点からも、砂州移動と汀線位置・土砂量変動の中長期変動との関連について、その特性を把握することは重要である。

こうした観点から、本研究では、千里浜海岸周辺における海浜地形変化に関する基礎的研究の一環として、国

土交通省金沢河川国道事務所により2000～2010年に取得された深浅測量データを基に、砂州移動に伴う変動成分を分離抽出し、経験的固有関数(EOF)法に基づく解析を行って、砂州の周期的移動の固有モードや対応する岸沖漂砂分布、土砂量変動等についてその特性を明らかにすることを試みる。

2. 対象領域および観測データの概要

(1) 対象領域の概要

対象領域は、石川県千里浜海岸(押水・羽咋海岸:宝達志水町・羽咋市)および隣接する高松・七塚海岸(かほく市)であり(図-1)、石川県手取川を土砂供給源とする広域流砂系の北端に位置する遠浅の砂浜海岸である。底質の大部分は細砂であり、南側ほど粒径が粗く、北へ向かうほど細かい。千里浜海岸の汀線近傍における代表的な粒径は0.15 mm前後である。対応する形で、一般に北側へ向かうほど緩勾配の海浜地形となる。水面下では大規模な沿岸砂州が2段、3段に発達し、背後には複列の砂丘を擁して砂州-砂丘系を構成している。前述した砂州の組織的移動サイクルにおいて、砂州は汀線近傍で形成され、冲向きに移動しながら最大規模に発達した後に、

さらに沖向きに移動して減衰・消失する。最沖砂州が消失すると、岸寄りに位置していた次世代砂州が沖向移動・発達を開始する。このような砂州の移動形態は、NOM(Net Offshore Migration)と称され¹²⁾、国内外で観察された現象と共通の特徴を示している³⁾。

金沢港におけるNOWPHAS観測結果の解析によると⁴⁾、夏期の平均有義波高は0.5 m程度であり波向はNNW~Wに広く分布する。冬期の平均有義波高は2 m程度、波向はNNWが支配的となるが、NW~Wからも高波浪が来襲する。年最大有義波高は5~8 mに達する。汀線近傍においては、通年で考えた場合、南西向きの沿岸流が卓越すると推定されている。一方、水深10 m以深では、北東向きの海岸流(吹送流および対馬海流)が存在している。金沢港における1997-2010年の平均潮位はT.P. 0.30 mであり、代表的な潮位変動は±0.20~0.25 m程度と小さい。

(2) 観測データの概要

本研究では、国土交通省金沢河川国道事務所による深浅測量データ(2000~2010年;計11回)に基づいて地形変化解析を行った。深浅測量は年1回、主に秋期(10月~11月初旬)に実施されている。沿岸方向約25 kmの解析対象域内に、北側から、千里浜(羽咋)4本、高松1本、七塚3本の計8本の測線を含んでいる(図-1)。以下、測線番号に付したH,T,Nは、それぞれ、千里浜(羽咋)、高松、七塚海岸に対応する。沿岸方向の測量間隔は2~4 km程度、岸沖方向の測量範囲は後背砂丘上の測量基点から1.5~3.5 km程度である。海岸構造物として、測線N50とN60の間に七塚白尾人工リーフ(施工期間1996-2001年)が、測線N70の北側直近に七塚木津人工リーフ(施工期間:2001-2008年)が設置されている。なお、測線H03の北側に近年今浜人工リーフが施工されたが、今回の解析期間は、その施工(2010-2013年)前となる。

3. 解析手法

(1) 前処理の概要

砂州変動解析の前処理として、まず、汀線直交方向への離岸距離補正を行った。今回解析対象とした8本の測線方向はすべてN307°であり、汀線直交方向とは必ずしも一致しない。この角度差は北側の測線ほど大きくなるため、適切な補正を施すことが望ましい。本解析では、航空写真で確認される砂州平面形状より、各測線近傍において沿岸方向に局所的(最大で沿岸距離600 m程度のスケール)な一様性が成立すると判断(仮定)し、測量基点からの離岸距離を汀線直交方向に射影して調整することとした。調整に用いた角度は約8~25°であり、最大で10%程度の離岸距離補正となる。

対象領域では、沿岸漂砂の不均衡等により、全体に汀



図-1 解析対象領域

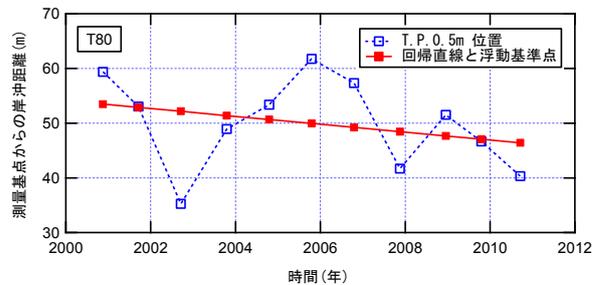


図-2 汀線位置変動と浮動基準点の設定例(測線T80)

線の長期後退傾向が存在し、その速度は測線により異なる。本研究では、地形変動解析の基準点として、各測線の汀線変化トレンドを考慮した浮動基準点を採用することで、これらの長期変動の影響を除去・軽減することとした。浮動基準点の設定にあたっては、Ruessinkら²⁾に従い、測量日直近の短期地形変動の影響を受けにくい朔望平均満潮位(T.P. 0.5 m)で定義される汀線位置の長期変動トレンドを算出して、各年次の岸沖方向基準点(離岸距離x=0位置)とした(図-2)。また、岸沖方向の測量実施間隔は不均一であるため、線形補間を用いて、地盤高データ(TP)を等間隔(10 m)に再配置し、浮動基準点から1.5 kmまでのデータを使用した。

(2) 基準断面地形の設定と砂州変動成分の抽出

次に、期間平均地形に平滑化処理を施して基準断面地形を設定し、砂州移動に伴う変動成分を分離抽出した。砂州の沖向移動速度は移動ステージにより異なり、また、11年の観測期間は当領域における砂州移動の再現期間(3~8年)と比較して十分な長さではないため、期間平均された断面地形には、砂州の凹凸形状の一部が残存する。期間平均地形からこの種の凹凸を除去して基準地形

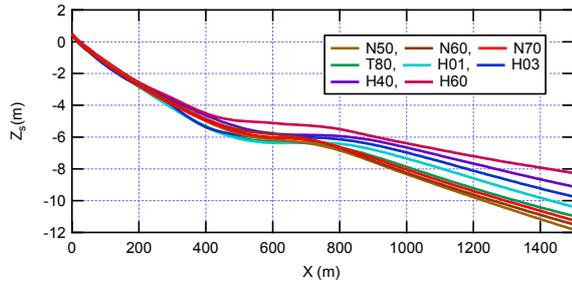


図-3 基準断面地形の沿岸方向比較

を設定し、砂州移動に伴う変動成分を適切に分離抽出するために、本研究では、いくつかのローパスフィルターの適用を試行した。その結果、KZ(Kolmogorov-Zurbenko)フィルター⁹⁾を用いて各測線における平均地形を平滑化し、各測線の基準断面地形として用いることとした。KZフィルターは、移動平均を繰返し適用する手法であり、元データの特徴を維持しつつ簡易・安定な平滑化が可能である。適用に際しては、移動平均の繰返し回数を3回、移動平均範囲については11点を標準に測線ごとに経験的に最適値を設定した。算出された基準地形は対象領域内で類似形状を示し、汀線近傍から緩やかに低下した後、離岸距離500~800 mにかけて平坦部を形成し、さらに沖合で再び緩勾配斜面へと遷移する(図-3)。全体に北側の測線ほど緩勾配で水深が小さく、平坦部を越えた沖合で地盤高の差が顕著に現れる。図-4は、高松海岸(T80)を対象に、観測期間中の海底地形変動と基準断面地形を例示したものである。基準地形の平坦部付近で砂州の規模は最大となり、平坦部を越えると急激に縮小する様子が見て取れる。これ以降の砂州変動の検討に際しては、各年度の地形(z)と基準地形(z_s)との差を取って砂州移動に伴う地形変動成分(z_b)を求め、z_bを対象として一連の解析を行った。

$$z_b(t, x) = z(t, x) - z_s(x) \quad (1)$$

(3) 砂州配置の固有モード解析

海底地形の変動成分(z_b)を対象に、実数型経験的固有関数法⁹⁾を適用し、沿岸砂州の周期変動に寄与する代表モードを抽出した。EOF法では、地盤高の時空間変動を複数の固有モードの重ね合わせで表現し、変動に対する寄与率の大きい順に第1、第2モードと順位付けを行う。個々の固有モードは、時間の関数である時間固有関数と、空間の関数である空間固有関数の積の形に変数分離され、海底地形の時空間変動は以下のように表される。

$$z_b(t, x) \cong \sum_{n=1}^N C_n(t) E_n(x) \quad (2)$$

ここで、E_nは第nモードの空間固有関数、C_nは第nモードの時間固有関数である。EOF法を適用して砂州変動の主

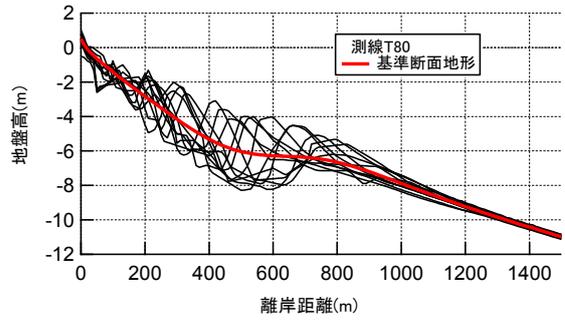


図-4 基準断面地形の設定例(測線 T80)

要モードを抽出した結果、砂州の組織的変動は第1、第2モードの組み合わせ(z_{b12})で良く表現されることが確認されたため、第1、第2モードの空間および時間固有関数を解析することで砂州配置の変遷を検討した。上位2モードを合わせた変動の寄与率は全変動の65~75%程度であり、北側の測線で高い値となる。

$$z_b(t, x) \cong z_{b12} = C_1(t) E_1(x) + C_2(t) E_2(x) \quad (3)$$

(4) 岸沖土砂移動の固有モードと土砂量変動の解析

続いて、Kuriyama⁷⁾, Roelvink・Renier⁸⁾を参考にし、断面内土砂量の保存式を積分して、岸沖漂砂量分布(沿岸方向単位幅あたり)の時空間変化を算出した。ここでは、離岸距離x₀=1500m(水深8~10m)での岸沖漂砂量を0と仮定し、EOF解析により抽出された変動の基本モード(第1、第2モードの組合せ)に対応する岸沖漂砂(q₁₂)分布の固有モードを算出した。その結果から、砂州移動の各段階における土砂移動のパターンや収支、前浜との関係について比較検討を行った。

岸沖漂砂のみを考え、地盤の空隙率をλとすると、砂州変動に伴う地盤高変化と岸沖漂砂量の関係は以下のように与えられる。

$$\frac{\partial z_{b12}}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)} \frac{\partial q_{12}}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

式(4)をxで積分し、積分領域沖側端x₀でq₁₂=0と近似して、式(3)を用いると、砂州移動に伴う漂砂量を推定できる。

$$q_{12} = (1-\lambda) \left[\frac{dC_1}{dt} \int_x^{x_0} E_1 dx + \frac{dC_2}{dt} \int_x^{x_0} E_2 dx \right] \quad (5)$$

最後に、砂州移動に伴う地形変動に起因する断面内土砂量(沿岸方向単位幅あたり)の経年変化を以下の式により計算し、砂州配置および汀線位置の中期変動、汀線近傍での岸沖漂砂との関連について検討した。

$$dV_{12} = \int_0^{x_0} z_{b12} dx \cong \left[C_1 \int_0^{x_0} E_1 dx + C_2 \int_0^{x_0} E_2 dx \right] \quad (6)$$

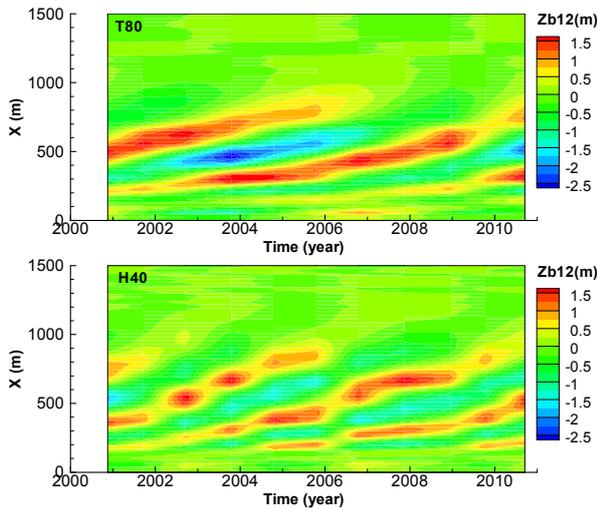


図-5 砂州変動モードの抽出例 (測線 T80, H40)

4. 解析結果および考察

(1) 砂州配置の固有モード

沿岸砂州の周期的冲向き移動に伴う地形変動は、EOF解析の第1, 第2モードの組合せで良く表現される。図-5は、代表的な測線について、両モードの重ね合わせによる変動をプロットしたものであり、汀線近傍で形成された砂州が冲向に移動・発達し、最終的に消失していく様子が捉えられている。また、一連のプロセスが周期的に繰り返され、その再現周期や移動範囲・速度等は測線により異なることも確認できる。

第1, 第2モードの時間および空間固有関数は、南端の測線N50 (砂州の周期移動が比較的不明瞭となる)を除いて、対象領域内でおおよそ類似した形状を示した(図-6, 7)。時間固有関数については、ゼロ値を中心に周期的に増減を繰り返す変動となるが、その周期は北寄りの測線で短めとなった。空間固有関数の形状についても、ピークの位置や大きさは測線により異なるものの、分布の概形は対象領域内でおおよそ相似であり、 E_1, E_2 ともに3つあるいは4つの極大値・極小値を有する。空間固有関数が極値を取る地点は、後述する砂州移動の4つのステージで砂州峯・谷となる岸沖位置に相当し、その間隔は沖に向けて増加する。極大値・極小値それぞれのグループについて、その岸沖位置を陸側から X_1, X_2, X_3 とすると、 X_1, X_2 の関係は、約2倍($X_2=2.2X_1$)の線形比例関係で推移し、 X_2, X_3 の比率は砂州位置が沖になるにつれて少し減少する。全体には、砂州峯と次の砂州峯(あるいは谷と谷)の位置関係は2次関数で良く近似される(図-8)。以下では、砂州の周期変動が最も明瞭な形で抽出された測線T80を例に、固有モードの特徴を議論する。

一般に、砂州の冲向移動に対応する2つのモードの時間固有関数 C_1, C_2 は互いに約1/4周期ずれた形で周期変動を繰り返す。このため、 C_1 が極値となる時点では、 C_2

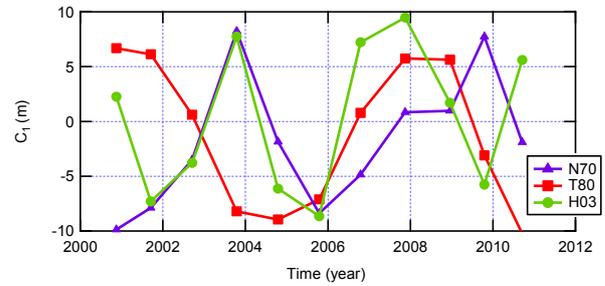


図-6 第1モード時間固有関数の比較

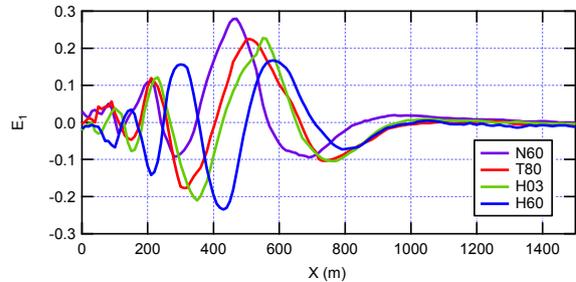


図-7 第1モード空間固有関数の比較

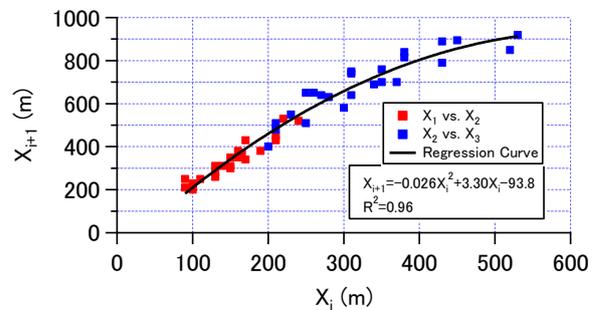


図-8 空間固有関数が極値となる位置の関係

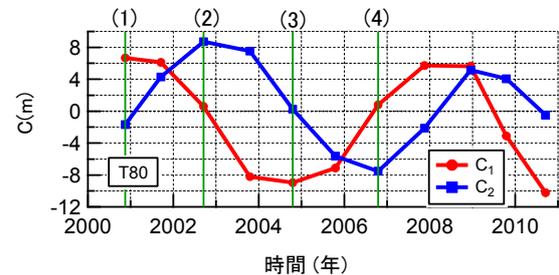


図-9 第1, 第2モードの時間固有関数 (測線 T80)

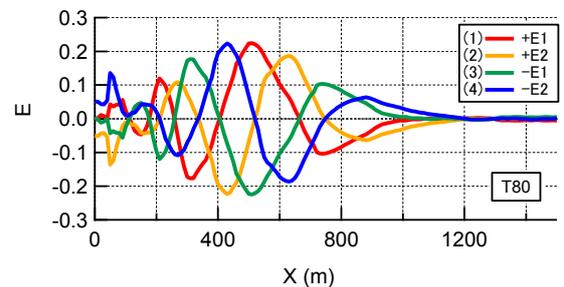


図-10 第1, 第2モードの空間固有関数 (測線 T80) (符号反転させたものも表示)

0となり、その逆も成立する(図-9)。その結果、1サイクルの間に第1, 第2モードが符号を変えながら交互に支配的となる。即ち、砂州移動に伴う地形変動の型は、図-10に例示した(1)+ E_1 , (2)+ E_2 , (3)- E_1 , (4)- E_2 の4つのパターンを順次推移する。図中(1)→(4)の変遷において、最沖砂

州が冲向移動しながら減衰し、対応して沖から2段目の砂州が冲向に移動発達する構造が明確に見て取れる。この測線の場合、砂州が最も発達するのは、離岸距離500m付近であり、基準地形平坦部の岸側端と対応する。離岸距離がさらに大きくなると減衰領域となり、1200mより沖側には変動は及ばない。離岸距離100m付近では、 E_1, E_2 がともに小さな値となり、サイクル間を通じて変動は微小となっている。これより沖側では、 E_1, E_2 の変動は正負の符号変化を伴い、基準地形を跨いだバー・トラフ型の地形変動を表している。一方、これより岸側での E_1, E_2 の変動は同符号の範囲内であり、ステップ状の地形変化と対応する場合もある。

(2) 岸沖漂砂の固有モード

式(5)に示したように、岸沖漂砂分布の時空間変動に対する固有モードは、 $E(x)$ の空間積分と $C(t)$ の時間微分の積により規定される。砂州配置が E_1 により規定される位相(C_1 が極値で、 $|C_1| \gg |C_2|$ となる)では $dC_1/dt \approx 0$ であり、逆に dC_2/dt はピーク値となるため、 $|dC_2/dt| \gg |dC_1/dt|$ となる。結果として、式(5)中の第2項が卓越し、対応する岸沖漂砂量の空間分布は E_2 の空間積分形により支配される。逆に砂州配置が E_2 により規定される位相では、岸沖漂砂量の空間分布は E_1 の空間積分形により支配される。なお、先に述べたように、 E_1 と E_2 の空間波形は互いに1/4波長ずれたような形を有するため、 E_2 の空間積分形の空間構造は E_1 に類似したものとなる。結果として、砂州配置が E_1 により規定される位相における岸沖漂砂量分布は E_1 と共通した空間構造を有する傾向がある(E_2 についても同様)。この意味で、 E_1, E_2 の空間分布形状は、砂州配置のみならず岸沖漂砂分布を規定する性質を有する。

岸沖漂砂分布の時空間変動に対する固有モードは、砂州移動の各段階において固有の土砂移動パターンを示す(図-11)。本測線においては、砂州峯位置の移動(形状としての移動)は、砂州のライフサイクルを通じて常に冲向きであるが、対応する土砂移動方向は冲向・岸向の両方に変化し得る。たとえば、図-12に示した砂州移動との対応例では、最沖砂州の冲向移動は上記(2)→(3)間では冲向漂砂に起因し、沖側から2段目となる砂州の冲向移動・発達には沖側トラフからの岸向土砂移動が寄与する。一方、(3)→(4)間後半の消失期には最沖砂州周辺の土砂移動は岸向きに転じる。逆に沖から2段目の砂州の発達移動は、(2)→(3)間では岸向漂砂、(3)→(4)間後半では冲向漂砂によりもたらされる。

(3) 土砂量変動・前浜との関係

砂州移動ステージに応じて、前浜との土砂授受が発生し、断面内土砂量は、4つの砂州配置型の変遷に応じた周期的変動を示す(図-13)。ただし、時間固有関数 C

には長期変動トレンドは見られないため、式(6)からもわかるように、1サイクル経過すると土砂量はおおよそ元の状態に戻る。この意味で、砂州の周期的冲向移動は土砂量の中期変動に関与するが、長期的な土砂量変動には寄与しない。これは、従来のNOM研究で推定されてきた特徴と整合する。砂州移動に伴って汀線位置での土砂輸送も岸向・冲向に周期変化する(図-13)。汀線付近の地盤高は、汀線における漂砂量の符号(輸送方向)と空間勾配に対応して、上昇・低下する。この変動は、図-2に例示した測量結果における汀線の中期変動(長期トレンドからの偏差の変動)と概ね符合する。

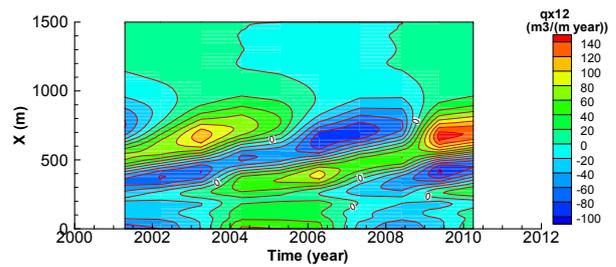
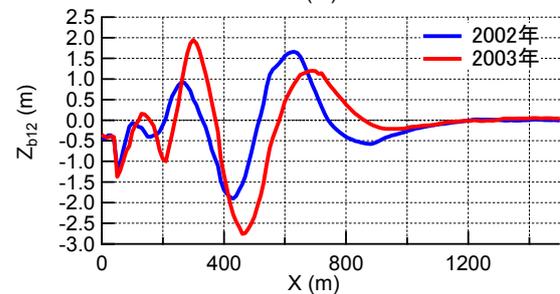
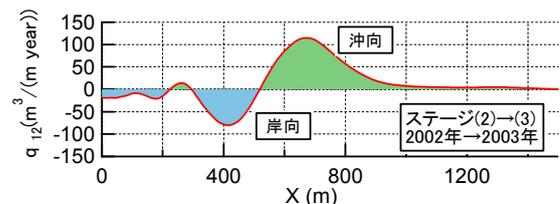
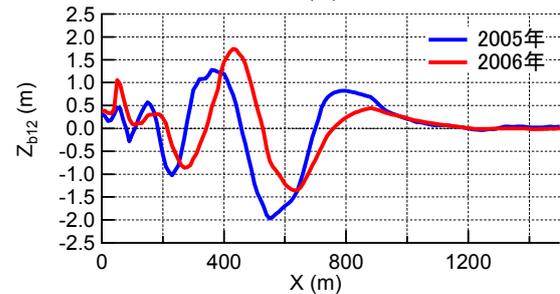
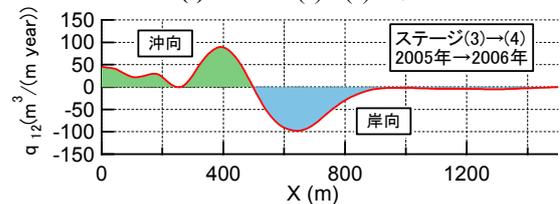


図-11 砂州移動に伴う岸沖漂砂の時空間変動(測線 T80)



(a) ステージ(2)→(3)前半



(b) ステージ(3)→(4)後半

図-12 砂州移動と岸沖漂砂分布の対応例(測線 T80)

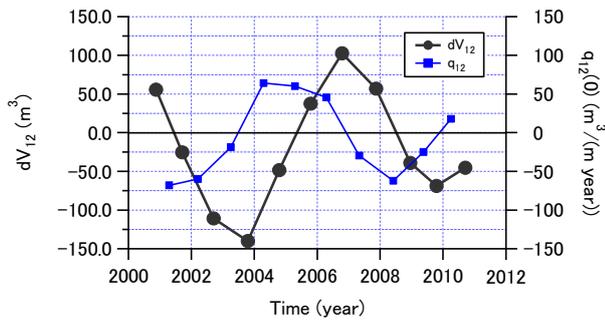


図-13 断面内土砂量と汀線での岸沖漂砂量の変化 (測線 T80)

5. 結論

石川県千里浜・高松・七塚海岸を対象に2000～2010年に取得された深浅測量データに基づき、多段砂州システムの周期的冲向移動に伴う変動成分を抽出し、EOF解析を適用して、砂州配置変動の主要モードや岸沖漂砂・土砂量変動との関係について解析を行った。

沿岸砂州の周期的冲向移動に伴う地形変動は、EOF第1, 第2モードの組合せで良く表現された。空間固有関数 $E_i(x)$ の形状は対象領域内でおおよそ相似であり、時間固有関数の周期は北寄りの測線で短めとなった。1サイクルの間に第1, 第2モードが符号を変えつつ交互に支配的となることから、砂州移動に伴う地形変動は、 $+E_1, +E_2, -E_1, -E_2$ で特徴付けられる4つの型を順に推移する。断面内土砂量保存式の積分から推定される岸沖漂砂分布の時空間変動に対する固有モードは、 $E_i(x)$ の空間積分と $C(t)$ の時間微分の積により規定され、砂州移動の各段階において固有の土砂移動パターンを示す。汀線近傍では、砂州移動ステージに応じて、前浜との土砂授受が発生し、断面内土砂量は周期的変動を示すが、1サイクル経過すると土砂量はおおよそ元の状態に戻る。この意味で、砂州の周期的冲向移動は土砂量の中期的変動に関与するが、長期的

な土砂量変動には寄与しない。

謝辞：本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金 (No.25420517) の補助を受けた。本研究で使用した測量データは、国土交通省北陸地方整備局金沢河川国道事務所より提供いただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Shand, R.D., Bailey, D.G. and Shepherd, M.J.: An Inter-site Comparison of Net Offshore Bar Migration Characteristics and Environmental Conditions, *Journal of Coastal Research*, Vol.15, No.3, pp.750-765, 1999.
- 2) Ruessink, B.G., Wijnberg, K.M., Holman, R.A., Kuriyama, Y. and van Enckevort, I.M.J.: Intersite Comparison of Interannual Nearshore Bar Behavior, *Journal of Geophysical Research*, Vol.108(C8), 3249, doi:10.1029/2002JC001505, 2003.
- 3) 由比政年・松山正之：千里浜海岸周辺における砂州の周期移動特性とその沿岸方向変化，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.69, No.2, pp.I_656-I_660, 2013.
- 4) Nguyen, C.T. and Yuhi, M.: Long-term Variation of Wave Characteristics on the Kaetsu Coast, Japan, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, Ser. B3 (Ocean Engineering), Vol.71, No.2, in press, 2015.
- 5) Zurbenko, I.: *The Spectral Analysis of Time Series*. North-Holland Series in Statistics and Probability, 258p., Elsevier, 1986.
- 6) Winant, C.D., Inman, D.L., and Nordstrom, C.E.: Description of Seasonal Beach Change using Empirical Eigenfunctions, *Journal of Geophysical Research*, Vol.80, No.15, pp.1979-1986, 1975.
- 7) Kuriyama, Y.: Medium-term Bar Behavior and Associated Sediment Transport at Hasaki, Japan, *Journal of Geophysical Research*, 107(C9), 3132, doi:10.1029/2001JC-000899, 2002.
- 8) Roelvink, D. and Reniers, A.: *A Guide to Modeling Coastal Morphology*, pp.115-120, World Scientific, 2012.

(2015.3.18 受付)

CROSS-SHORE SEDIMENT TRANSPORT AND SEDIMENT VOLUME CHANGE DURING SYSTEMATIC MIGRATION OF MULTIPLE SANDBARS

Masatoshi YUHI, Taichi OGURA and Masayuki MATSUYAMA

The characteristics of systematic net-offshore migration of the multiple bar system on the Chirihama and neighboring beach, Japan, have been investigated using a set of annual field surveys collected over 11 years. An EOF analysis has been conducted on the periodic movements of the sandbars, and the related cross-shore sediment transport and sediment volume variation were examined. The migration cycle of bars consisting of the successive generation, migration and degeneration were well reproduced by the combination of the 1st and 2nd eigen-modes, and these two modes become dominant alternatively. The principal modes of cross-shore sediment transport are shown to be characterized by the spatial integration of space eigen-function and the temporal derivative of the time eigen-functions. Corresponding to the cyclic movement of sandbars, the direction of sediment transport at the shoreline changes alternatively between seaward and landward directions. The sediment volume over the profile varies accordingly, but on the long-term the net-offshore migration of sandbars does not contribute to the sediment volume variation.