

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

内山 雄介 *・栗山 善昭 **

要 旨

仙台湾北部の蒲生干潟前面海浜における中期地形変動特性を主成分解析および複素主成分解析によって検討した。解析に先立ち、主成分解析を海浜地形データに適用した場合の出力特性等に関する基礎的な評価を行い、複素主成分解析は通常の主成分解析に比べて、土砂移動に代表される地形変動の進行波的な挙動の解析に対して優位である反面、一様な変動に対しては時間に関する固有関数の分布形状が若干歪むことなどを指摘した。さらに、河川からの土砂供給、港湾構造物による沿岸漂砂の不均衡、沖合海域との土砂交換など、複数の因子が絡み合った仙台港南部の蒲生干潟前面海浜地形の中期変動特性を把握するべく、約 12 年間の深浅測量データに対して主成分解析および複素主成分解析を適用し、様々な要因による地形変動パターンを分離することを試みた。その結果、蒲生干潟前面海浜における土砂の移動経路や変動周期等の諸特性を抽出することに成功するとともに、外力データとの対応を検討することによって、地形変動特性とそのメカニズムについて考察した。対象海域全体の地形変化に対しては、河口テラスの発達・衰退が最も寄与しており、次いで河川から沖合海域へ流出する土砂の系内への再流入、岸沖漂砂による土砂移動が関与していることを明らかにした。

キーワード：複素主成分解析，砂浜海岸，河口域，地形変化，潟湖干潟

* 海洋・水工部 主任研究官

** 海洋・水工部 漂砂研究室長

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 港湾空港技術研究所

電話：0468-44-5045 Fax：0468-41-9812 e-mail: uchiyama@pari.go.jp

A Complex Principal Component Analysis on Medium-term Morphological Behavior of an Exposed Sandy Beach Before Gamo Lagoon at Sendai Coast, Japan

Yusuke UCHIYAMA*

Yoshiaki KURIYAMA**

Synopsis

Principal component analysis (PCA) and complex PCA (CPCA) are applied to examine medium-term morphological behavior of a sandy beach before Gamo lagoon located at the mouth of Nanakita River along Sendai Coast, Japan, using a 12-year series of bottom survey data. The basic features and applicability of PCA and CPCA to beach morphology data sets are preliminary investigated with model topography data; CPCA is found to have the strong advantage of capability of representing propagating-wave-like migration of topography by using only single mode, whilst PCA necessitates two modes to reproduce such migrating processes. However, the results of CPCA for spatially uniform erosion model show that the both of real and imaginary part of the eigenfunction $c_n(t)$ are appreciably distorted in their time series plots owing to the Fourier series expansion in the Hilbert transform procedure. The results of PCA and CPCA for the morphology data set show that erosions and accretions of the submerged terrace formed in front of the river mouth appear in the first mode of CPCA and have the most significant influence on the medium-term morphological processes. The second mode of CPCA demonstrates that the sediments previously discharged from the river return again into the nearshore region, and furthermore, the topography changes due to cross-shore sediment transport emerge in the third mode of CPCA.

Key Words: complex principal component analysis, sandy beach, river mouth, morphological process, coastal lagoon

* Corresponding author, Senior Researcher, Littoral Drift Division

** Head, Littoral Drift Division

Port and Airport Research Institute, 3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-468-44-5045 Fax : +81-468-41-9812 e-mail: uchiyama@pari.go.jp

目 次

| | |
|-----------------------|----|
| 要 旨 | 1 |
| 1. はじめに | 5 |
| 2. 方法 | 5 |
| 2.1 深浅測量の概要 | 5 |
| 2.2 主成分解析の概要 | 6 |
| 2.3 主成分解析の特性 | 7 |
| 3. 結果 | 11 |
| 3.1 深浅測量結果 | 11 |
| 3.2 主成分解析結果 | 11 |
| 4. 考察 | 15 |
| 4.1 地形の再合成 | 15 |
| 4.2 地形変動と外力との関係 | 17 |
| 5. おわりに..... | 19 |
| 5.1 結論 | 19 |
| 5.2 今後の課題 | 19 |
| 謝辞 | 20 |
| 参考文献 | 20 |

1. はじめに

仙台湾に注ぐ七北田川の河口域潟湖干潟である蒲生干潟は、渡り鳥をはじめとする豊かな生態系を育む貴重な空間であり、その保全が強く望まれている（例えば、栗原，1980）。蒲生干潟の生態系に影響を与えるものと考えられる干潟内の地形変化は、ラグーンと海洋を隔てるバリアー・アイランド上の越波によって大量の土砂が干潟内に運び込まれるために生じている可能性が高い（田中・山内，1997）。また、蒲生干潟は河口部に位置するため、河口域に土砂が堆積して閉塞が生じた場合、塩分の低下によってラグーン内の水質環境が変化し（上原，1984）、底生生態系にインパクトを与えることが危惧される。すなわち、ラグーン内の生態環境を保全するためには、バリアー・アイランドの維持と河口閉塞の抑制という二重の意味で、前面海浜の地形変動特性を把握しておくことが必要不可欠となるものと理解される。

七北田川、名取川、阿武隈川等の沖積作用によって形成された仙台平野の東端に位置する仙台湾沿岸は、南東方向に太平洋を臨む延長約60kmの海岸であり、このうち調査海域を含む宮城県仙台北部から福島県松川浦に至る50kmの区間は砂浜海岸である。既往の研究によると、この砂浜域では北向きの沿岸漂砂が卓越するとされているが（佐藤ら，1966；宇多ら，1990）、仙台北部では1968年以降の南防波堤の建設に伴って局所的な侵食が生じたことが知られており（田中，1983）、その原因の一つとして防波堤からの反射波の影響が考えられている（森下ら，1995）。そのため、1973、1974年には養浜が行われ、1977年から1982年にかけて防波堤基部に延長250mの翼堤が建設された。また、仙台湾では水深約18m程度の沖合海域でも有意な土砂移動が生じていることが指摘されていることもあって（田中ら，1995）、特に沖合海域を含めた広範囲での漂砂特性は解明されるまでには至っていない。

一方、仙台市内を流れる七北田川は、幹線流路延長45km、流域面積229.1km²の2級河川であり、仙台北部防波堤から南西へ約2kmの地点で仙台湾に注いでいる。七北田川河口は、そもそも現河口位置より約1km北側にあったが、昭和40年代の仙台北部建設に伴い旧河口が締め切られ、現在の河口地形が形成された。その際に取り残された水域が蒲生干潟であり、現在でも河口閉塞がたびたび生じている（田中，1995）。以上のことから、蒲生干潟前面海浜の地形変化に対しては、河口テラスの発達等に代表される河川からの土砂流出の影響、構造物周辺における沿岸漂砂の不均衡、沖合海域との土砂交換といった複数の要因が複雑に重畳して影響を与えているものと考えられる。

そこで本研究では、多くの因子が絡み合った仙台湾南部の地形変動特性を把握するべく、蒲生干潟前面海浜における約12年間の深淺測量データに対して主成分分析を適用し、様々な要因による地形変動の特徴を分離することを試みる。主成分分析は、経験的固有関数解析あるいは経験的直交関数解析とも呼ばれ、時間的に変動するスカラー量の空間分布データ（水深分布など）を、統計的に意味を持つ高々数個の有意なモードに分割することによって現象の特徴を抽出しようとする解析手法である。この解析方法は、気象学や海洋物理学に代表される地球物理学分野で広く用いられるとともに、海浜地形変動データに対しても多くの適用事例があり、その有効性が確認されている（例えば、Winant, *et al.*, 1974）。さらに、近年海浜地形データに適用されつつある複素主成分分析は、地形変動の定在波成分だけではなく、進行波成分をも単一の固有関数で表現することができるため（Horel, 1984；北野ら，1999）、沿岸域における土砂の移動問題に対して有効な解析手法となることが期待されている。

本研究ではまず、主成分分析および複素主成分分析をモデル地形変動データへ適用することによりその基本的な特性を検討し、次いで、両者を実際の深淺データに適用した。そして、複素主成分分析によって特徴的な地形変動パターンを抽出するとともに、波浪データや河川流量データとの対応を検討することにより、地形変動特性とそのメカニズムについて考察したので、その結果について報告する。

2. 方法

2.1. 深淺測量の概要

深淺測量は、国土交通省塩釜港湾空港工事事務所によって、1986年から1998年まで年1回の頻度で合計13回、毎年8月（1990年のみ9月）に行われた。図-1に示すように、仙台北部の七北田川河口右岸側から仙台北部防波堤にかけての沿岸距離約3km、塩釜港工事基準面（D.L. = T.P.-0.84m）-18m強の沖合海域からD.L.+3mの後浜にかけての岸沖距離約2kmの範囲で深淺測量が実施された。水深データは、沿岸方向に50m間隔、岸沖方向に10m間隔でデジタルデータとして整理されている。水深データの鉛直座標系は、塩釜港のD.L.を基準面にして、そこから下向きが正と定義されている。また、参照データとして、塩釜港湾空港工事事務所および港湾空港技術研究所による仙台北部沖水深20m地点の波浪データ（図-1中の「USW」地点）、および宮城県土木部による七北田川約15km地点の市名坂における流量データを使用した。

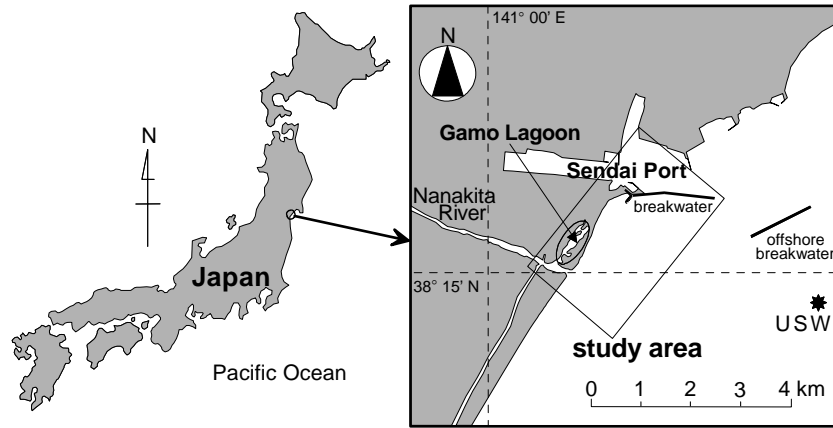


図-1 現地調査実施海域. 宮城県七北田川河口右岸側より仙台湾南防波堤まで. 深浅測量は1986年8月より約1年ごとに1998年8月まで13回実施. USWは塩釜港湾空港工事事務所・港湾空港技術研究所による沖波計測用の波高計設置位置を示している.

2.2. 主成分解析の概要

得られた深浅測量結果に対し、主成分解析 (Principal Component Analysis : 以下, 「PCA」と表記) および複素主成分解析 (Complex Principal Component Analysis : 以下, 「CPCA」と表記) を適用した. 主成分解析は, 経験的固有関数解析 (Empirical Eigenfunction Analysis) あるいは経験的直交関数解析 (Empirical Orthogonal Function Analysis : EOF) と呼ばれることもあり, 時間的に変動する複雑なスカラー空間分布データ (この場合, 海底断面地形変化データ) を, 統計的に意味を持つ高々数個の有意なモードに分割することによって現象の特徴を抽出しようとする解析手法である. この解析方法は, 予め指定した直交関数 (三角関数) の重ねあわせとして現象を表現しようとするFourier解析等とは根本的に異なり, 取得された空間分布データ $h(x, y, t)$ を直接解析に用いることにより, 空間と時間に関する直交関数 $e_n(x, y)$, $c_n(t)$ を「経験的に」決定する点に特徴がある.

PCAは, 地球物理分野で広く用いられるとともに (例えば, Horel, 1984), 海浜地形変動データに対しても多くの適用事例があり (例えば, Winant, *et al.*, 1975, Aubrey, 1979; Aubrey *et al.*, 1980; 加藤・吉松, 1984; Seymour, 1989), その有効性が確認されている. 一方, CPCAは気象学分野で開発され (Wallace and Dickson, 1972) 地球物理学分野の様々なデータセットに対して適用されるように拡張されるとともに (例えば, Barnett, 1983), 海浜地形データ解析にも用いられつつある (Liang and Seymour, 1991; Liang *et al.*, 1992; Bosma and Darlymple, 1996; 横木ら, 1999; 栗山・李, 2000; Ruessink *et al.*, 2001; Kuriyama

and Lee, 2001). CPCAは, 変動の定在波成分だけではなく進行波成分も単一の固有関数で表現することができるため (Horel, 1984; 北野ら, 1999), 沿岸域における土砂の移動問題に対して, 特に有効な解析手法となることが期待されている.

本研究では, まず, 複数の測線上に分かれて平面的に分布しているスカラーの時系列データ $h(x', y', t)$ (今回の場合は平面的に取得された12年間分の水深データを, 測線を連結し1本の測線上のデータと見なすことにより, 擬似的な平面データへの座標変換操作を施す.

$$h(x', y', t) \rightarrow h(x, t) \quad (1)$$

これは厳密な意味での3次元解析 (Kroonenberg and DeLeeuw, 1980; Bosma and Darlymple, 1996) ではなく, いわば擬似的な3次元解析を行うことを意味するが, その有効性については, 加藤・吉松 (1984) や横木ら (1999) によって確認されている.

さて, 本研究におけるCPCAではまず, 上記のように座標変換された $h(x, t)$ のHilbert変換 $\tilde{h}(x, t)$ を求め, $h(x, t)$ と $\tilde{h}(x, t)$ の和を取ることで, 複素水深 $H(x, t)$ を式 (2) のように新たに定義する.

$$H(x, t) = h(x, t) + i\tilde{h}(x, t) = H_{mn} \quad (2)$$

ここで, H_{mn} は x, t 軸方向に離散化された複素水深を表す. なお, $h(x, t)$ とそのHilbert変換 $\tilde{h}(x, t)$ との間には以下のような関係が成立する.

$$h(x, t) = \sum_{\omega} \{a(x, \omega) \cos \omega t + b(x, \omega) \sin \omega t\} \quad (3)$$

$$\tilde{h}(x, t) = \sum_{\omega} \{b(x, \omega) \cos \omega t - a(x, \omega) \sin \omega t\} \quad (4)$$

すなわち、 $\tilde{h}(x, t)$ は $h(x, t)$ の各スペクトル成分の振幅を変えず、位相のみを $\pi/2$ 進めたものである。この操作によって得られる複素水深 $H(x, t)$ には、物理的には、変動そのものの情報に加えて、その位相情報が含まれるものと解釈される。

次に、離散化された複素水深 H_{mn} の共分散マトリクス B を以下のように定義する。

$$B = [b_{jk}] = \frac{1}{N_x N_t} \sum_{n=1}^{N_x} H_{nj}^* H_{nk} \quad (5)$$

ここで、 N_x 、 N_t はそれぞれ平面上の測点の数、深浅測量された回数を、また、 H^* はマトリクス H に対する共役複素マトリクスを表している。PCAが類似した方法で求められる水深 h の実対称相関マトリクスの固有値問題に帰着するように、CPCAは、この共分散マトリクス B の固有値問題に帰着する。すなわち、この行列の n 番目の固有値 λ_n および固有ベクトル $(u_n)_k$ を、

$$B \cdot u_n = \lambda_n u_n \quad (6)$$

と定義し、さらに、

$$(c_n)_k = \sqrt{\lambda_n N_x N_t} (u_n)_k \quad (7)$$

とすると、この $(c_n)_k$ と固有値 λ_n に対応したベクトル $(e_n)_j$ が以下のように定義される。

$$(e_n)_j = \frac{1}{\lambda_n N_x N_t} \sum_{k=1}^{N_t} (c_n)_k H_{jk} \quad (8)$$

このようにして求められた $(c_n)_k$ 、 $(e_n)_j$ を用いることにより、複素水深 $H(x, t)$ は以下のように表現される。

$$H(x, t) = \sum_n e_n(x) \cdot c_n(t) \quad (9)$$

ここで、添字 n は各変量が元データの第 n 主成分であることを示しており、 $c(t)$ 、 $e(x)$ はそれぞれ時間、場所に関する複素数の直交関数（固有関数）である。また、各第 n 主成分の地形変化の全体に対する寄与率は、固有値（実数）と共分散マトリクス B のトレースを用いて、以下のように表される。

$$\lambda_n / T_r(B) \quad (10)$$

したがって、式(10)で定義される寄与率の大きいモードが、対象海岸における（統計的に）有意な地形変化を表していることになる。通常は固有値 λ_n の大きい順に並べ換え、それぞれモード1, 2, 3, ...と呼ぶことが多いが、本研究でも同様の呼称を用いる。

複素主成分解析（CPCA）の最終的な結果が式(9)のように表現されるのに対して、通常の主成分解析（PCA）の結果は式(11)で表現される（例えば、加藤・吉松、1984）。

$$h(x, t) = \sum_n e_n(x) \cdot c_n(t) = \sum_n h'_n(x, t) \quad (11)$$

ここで、 $c(t)$ 、 $e(x)$ はそれぞれ実数値を取る時間、場所に関する直交関数であり、 h'_n はPCAにより分解された第 n モードの h である。このように、PCAでは、導出された直交関数の積を取ることで、オリジナルの変動データを各モードの変動データに分離して表現することができる。これに対して、CPCAによる表現式(9)では、変動データは複素値で表現されているため、モード毎に分離された変動データの特性を物理的・直感的に理解しやすくするためには、以下の式(12)によって実数データに再変換する操作が必要となる（Horel, 1984; Liang and Seymour, 1991）。

$$h(x, t) = \sum_n \text{real}\{e_n^*(x) \cdot c_n(t)\} = \sum_n h'_n(x, t) \quad (12)$$

ここに、 h'_n ：CPCAにより分解されたモード n の h 、 $e_n^*(x) : e(x)$ の共役複素マトリクス、をそれぞれ表している。つまり、PCAでは水深データの実対称相関マトリクスの固有値問題として導出された直交関数（固有関数） $e_n(x)$ と $c(t)$ の単純な積の総和としてオリジナルの水深データが表現されるのに対して、CPCAでは、関数 $e(x)$ および $c(t)$ が複素値を取るため、 $e(x)$ の代わりに $e^*(x)$ を用いて式(12)を計算し、実部の総和を取ることで、実際の地形データが再合成される。

なお、本研究では、加藤・吉松（1984）と同様に、式(1)で表現される座標変換を用いた解析を行うと同時に、式(2)～(9)に示したように、 $c(t)$ の直交性を利用して、 $e(x)$ ではなく $c(t)$ の固有ベクトルを最初に求める方法を採用し、計算効率の改善を図っている。

2.3. 主成分解析の特性

前節で述べたように、海浜地形変動データに対してCPCA（複素主成分解析）を適用した研究成果は幾つかあるが（例えば、Liang and Seymour, 1991; 横木ら, 1999;

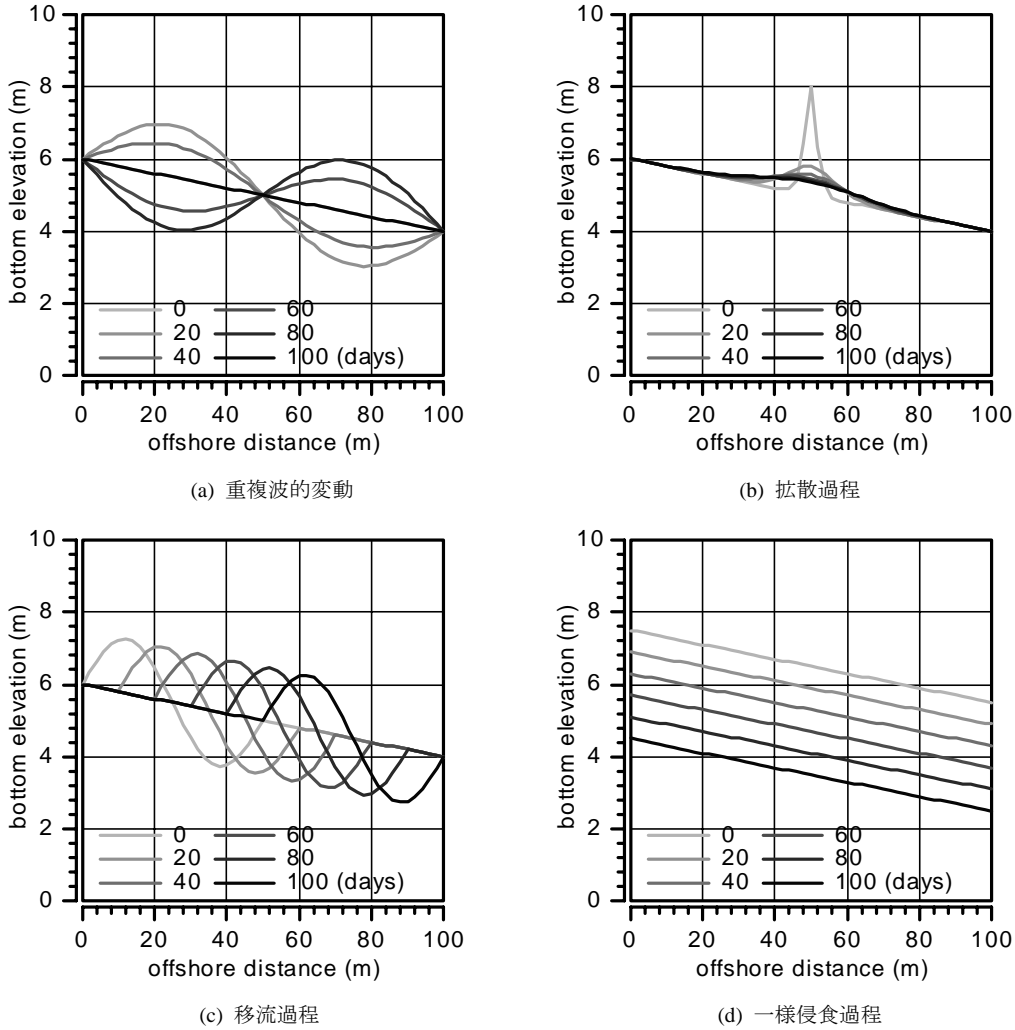


図-2 設定したモデル地形：100日間・20日毎の地形の重ね合わせ

栗山・李, 2000ほか), 海浜地形データへの適用性やなどの基礎的な特性については, 北野ら (1999) の検討例を除くと殆ど調べられておらず, 十分に理解されているとは言いがたい. そこで本研究では, 単純なモデル変動地形データに対してPCAおよびCPCAを適用し, 固有関数 $e(x)$, $c(t)$ の挙動を調べることにより, その基本特性の一端を精査することを試みる.

検討に用いるモデル変動地形データは, いずれも砂浜海岸に典型的に見られる地形変動パターンを模擬したものであり, 一様勾配斜面の海浜で生じる以下の4つの地形変化パターンである. すなわち, 図-2にそれぞれ100日間の地形変動を20日毎に示しているように, (a) 岸沖方向の土砂移動に伴う「重複波の変動」, (b) 凸部地形が徐々に岸沖方向へ広がっていく「拡散過程」(ここでは拡散方程式の数値解を使用), (c) 正弦波状地形がその形状を保持したまま岸沖方向へ輸送される「移流過程」, (d) 全断面

が時空間的に一様な侵食作用を受ける「一様侵食過程」, の4通りである.

この4つのモデル変動地形に対して, PCAおよびCPCAを適用した結果を図-3に示す. ここでは, 各地点における平均地盤高さを元のデータから減算した後に解析を実施しているため, $e(x)$ や $c(t)$ のグラフからは, 一様斜面の形状は, 見かけ上現れなくなる点に注意されたい. まず, 重複波の変動 (図-2 (a) 参照) に対する結果を見ると (図-3 (a-1)~(a-4)), PCA, CPCAともにモード1の寄与率が100%であり, 単一のモードだけで時空間変動を表現することができていることが分かる. 一方, 拡散過程 (図-2 (b) 参照) に対する結果 (図-3 (b-1)~(b-4)) には, モード1の寄与率はPCAでは85%, CPCAでは91%であり, これについても単一のモードだけで時空間変動をほぼ完全に表現できていることが示されている. 拡散現象はFourier級数展開 (三角関数) で表現する場合は無限項数を必要と

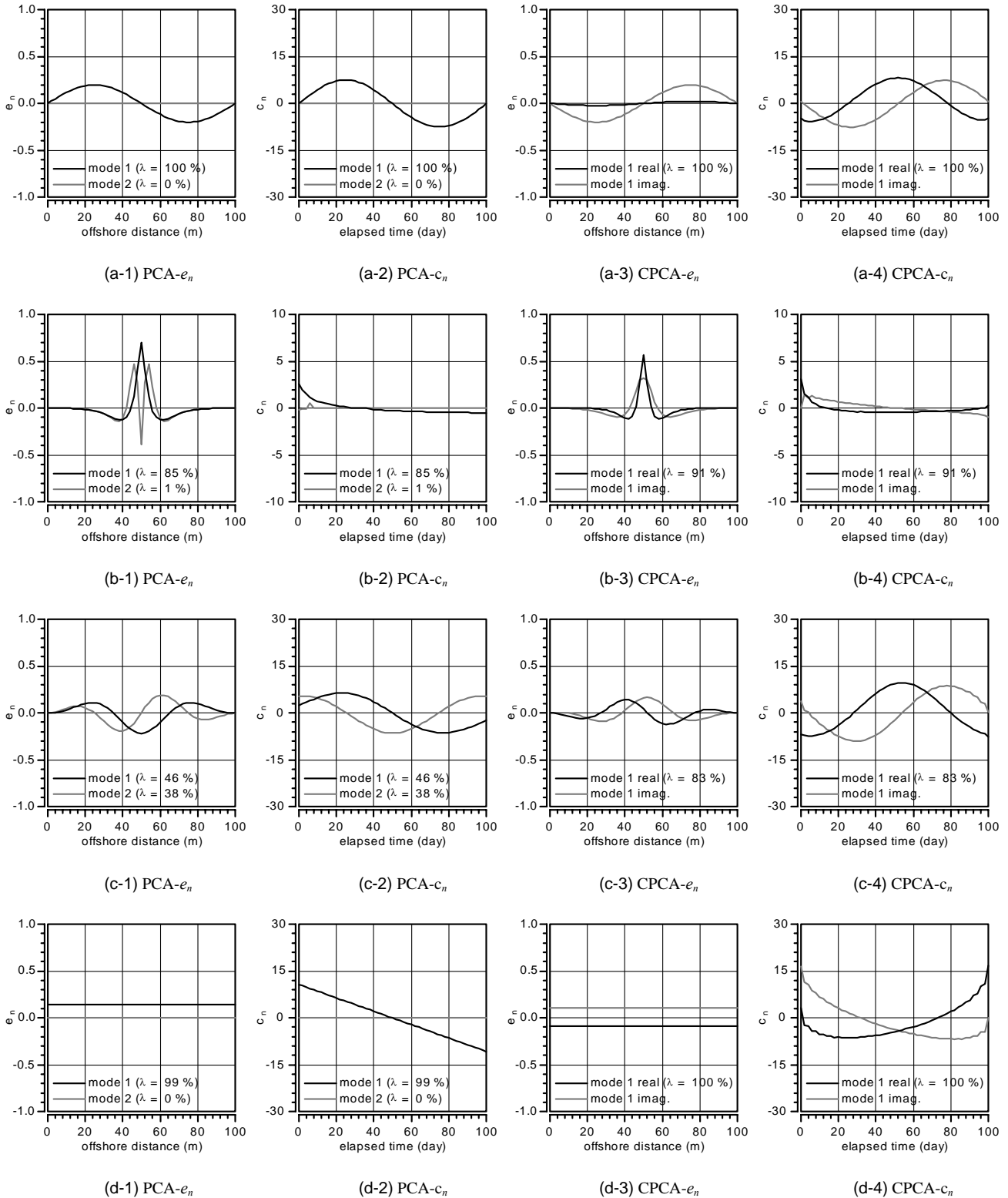


図-3 モデル変動地形への主成分解析 (PCA), 複素主成分解析 (CPCA) 適用結果: PCA はモード 1 とモード 2, CPCA はモード 1 の実部と虚部のみを表示しており, グラフ中の λ は, 各モードの寄与率を%で表したものである. また, (a-1)~(a-4) は重複波の変動 (図-2 (a) 参照), (b-1)~(b-4) は拡散過程 (図-2 (b) 参照), (c-1)~(c-4) は移流過程 (図-2 (c) 参照), (d-1)~(d-4) は一様侵食過程 (図-2 (d) 参照), に対する計算結果である.

するのに対して, PCA, CPCAではともに単一の固有関数で表現できる点は興味深く, これは, 変動を代

表する直交関数を「経験的」に求める本解析方法の大きなアドバンテージであるものと考えられる.

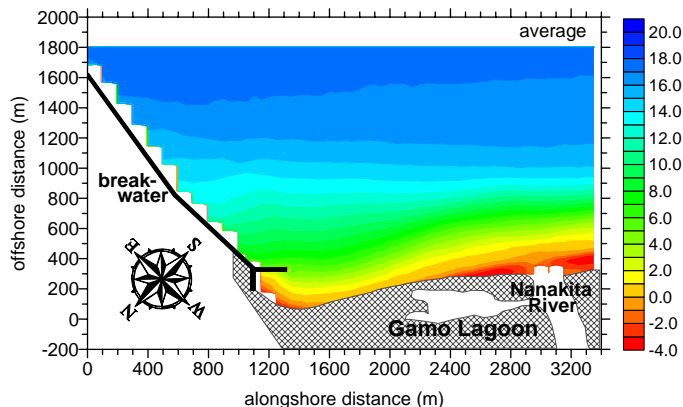


図-4 平均水深 (コンター間隔: 1m)

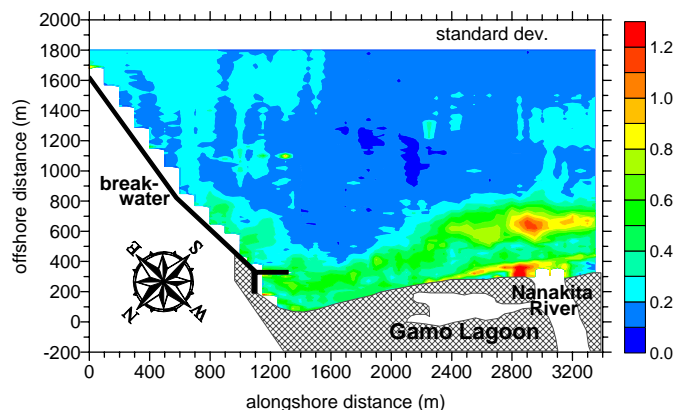


図-5 水深変動の標準偏差 (コンター間隔: 0.1m)

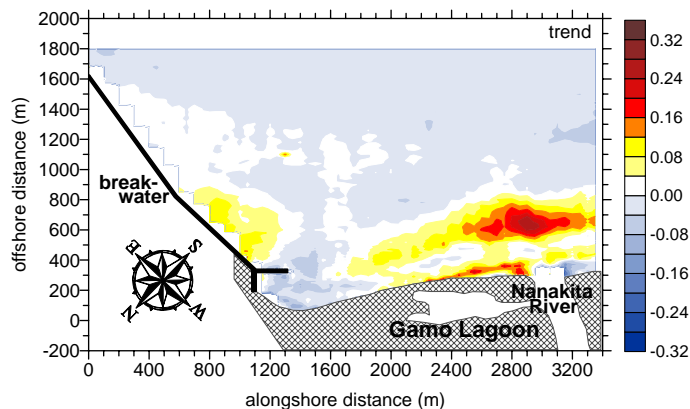


図-6 水深変化のトレンド (コンター間隔: 0.04m/y)

また、移流過程(図-2 (c) 参照)に対する結果(図-3 (c-1) ~ (c-4)) は他の3ケースとは若干様子が異なっており、PCAではモード1の寄与率が46%、モード2が38%と、この2つのモードの合計で全体の84%の現象を説明しているのに対して、CPCAではモード1の寄与率が83%に達している。このことから、土砂の移流過程に代表される進行波的な現象については、PCAでは単一モードだけでは十分に表現することができず、CPCAであれば単一のモードで正確に表現することができることが分かる。なお、PCAでは、進行波的な変動パターンは複数の重複波モー

ド重ね合せとして表現されているが、このことから、進行波的な現象に対してPCAを行う際には、複数のモードに跨って結果を照査しないと解釈を誤る危険があると言える。

ではCPCAが万能かという点、必ずしもそうではない。というのも、一様侵食過程(図-2 (d) 参照)に対する結果(図-3 (d-1)~(d-4))を見ると、PCA、CPCAともにモード1だけで現象を全て説明できており、PCAは空間関数 e_n は一定、時間関数 c_n は単調減少と、一様侵食傾向が正しく表現されている。しかしながら、CPCAでは時間関数

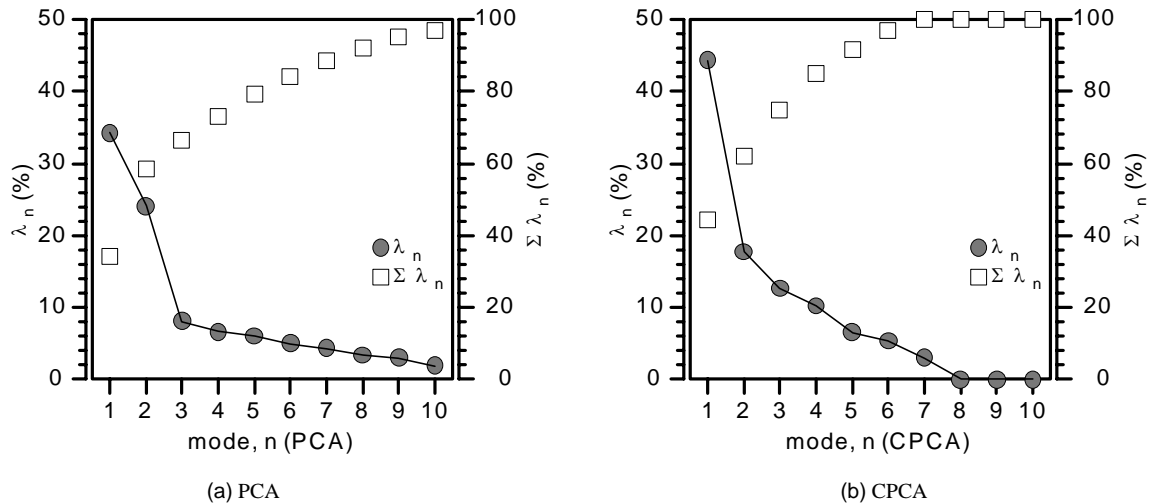


図-7 PCA, CPCAによる各モードの寄与率 λ_n (%)とその累積値 $\Sigma \lambda_n$ (%)

c_n が単調減少しておらず、実部・虚部ともに大きく歪んでいる様子が見て取れる。これは、Horel (1984) も指摘しているように、オリジナルの実数データを複素化する際、虚部を導出するのにFourier級数展開をベースとしたHilbert変換を用いていることに起因する。つまり主成分解析は、三角関数のような直交関数を予め指定しないで、データから直交関数を求めようとするところに特徴を持つ解析手法であるが、CPCAの場合には複素データを作成する際にHilbert変換を施さなければならず、一旦、オリジナルデータを三角関数に級数展開するという点で、若干の矛盾を含んでいることを認識する必要がある。なお、実際の自然現象の中に、単調あるいは不連続な現象が存在する可能性は低いものと推測されるが、海浜地形データに対してPCA, CPCAを適用する際には、以上のような点に留意して解析を行う必要があると言えよう。

3. 結果

3.1. 深浅測量結果

まず、対象海域における12年間の地形変化特性の特徴を調べるために、深浅データの平均値、標準偏差、トレンドを求めた結果を、それぞれ図-4～図-6に示す。このうち図-6のトレンドは、各測量地点における地盤高の時系列に対する最小二乗近似直線の傾きを示したものであり、水深表示しているの、正であれば水深が増大することになるため侵食を、負であれば逆に堆積を表すことになる。例えばトレンドが0.1m/yであれば、その場所の水深は毎年0.1mの速度で増大している（すなわち侵食されている）ことになる。

さて、図-4を見ると、最沖部の平均水深は18m強であり、

海浜の平均勾配は沖合海域を含めて1/100程度、そのうち前浜勾配は1/30程度であることが分かる。水深約10m以下の浅海域の等深線は概ね汀線に平行であるが、浅海域では、河口部ほど等深線が若干沖側へ張り出しており、かつその間隔は密になっている。この河口前面部は、図-5の標準偏差を見ると対象領域の中で地盤変動レベルが最も大きくなっており、しかも図-6のトレンドから侵食が進行している領域であることが分かる。また、図-5および図-6から、防波堤基部付近は翼堤の沖側で侵食、岸側で堆積傾向にあることが見て取れる。これらの領域では地形変動の標準偏差が相対的に大きくなっているが、特に河口から蒲生干潟直前面にかけての海域では、水深3～10mの範囲と3m程度以浅では傾向が異なっており、前者は変動レベルが大きく侵食傾向にあるのに対し、後者は変動が少なく僅かに堆積傾向にある。さらに、河口部の水深0m以下の前浜から後浜にかけての領域では、左岸側で侵食、右岸側で堆積傾向にあり、特に左岸側では変動レベルも大きく、波浪条件や河口の開閉状況等に対応して汀線近傍の地形が激しく動いている様子が見て取れる。

3.2. 主成分解析結果

以上のような海浜地形データに対し、PCAおよびCPCAを適用した。図-7はPCA, CPCAにおける各モードの寄与率 λ_n およびその累積値 $\Sigma \lambda_n$ を%で示したものである。モード1から3までの寄与率は、PCAではそれぞれ34.2%、24.1%、8.1%、CPCAでは44.3%、17.8%、12.6%であり、主要3モードだけで全体の変動の66.4% (PCA) および74.7% (CPCA) を説明することができている。そこで以下では、この主要3モードについて検討を行う。

図-8と図-9はそれぞれ、PCAおよびCPCAを適用して得

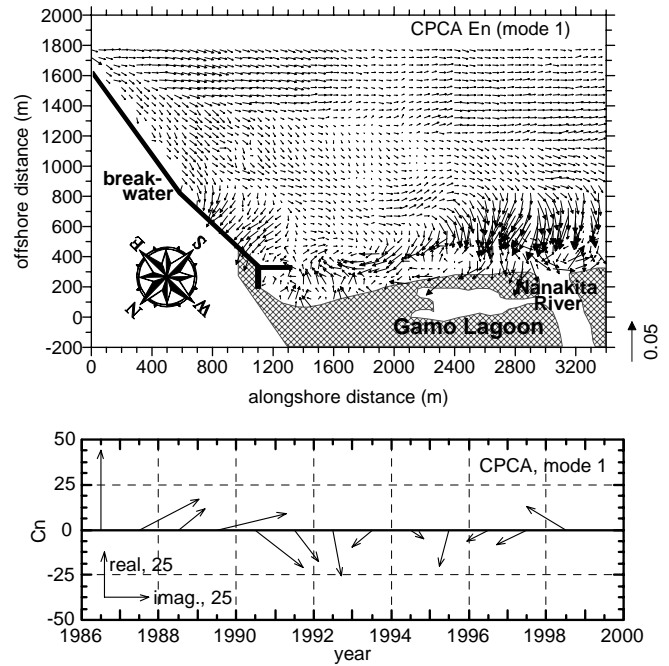
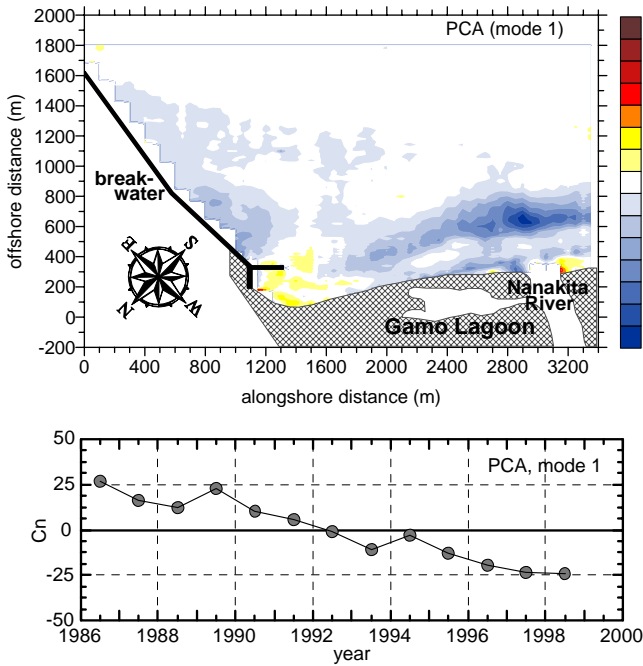


図-8 PCAによるモード1 (寄与率 34.2%) の固有関数 e_n の空間分布 (上) と時間関数 c_n の時系列 (下).

図-9 CPCAによるモード1 (寄与率 44.3%) の複素固有関数 e_n の空間分布 (上) と複素時間関数 c_n の時系列 (下). ベクトルは上向き: 実部, 右向き: 虚部 (以下同様)

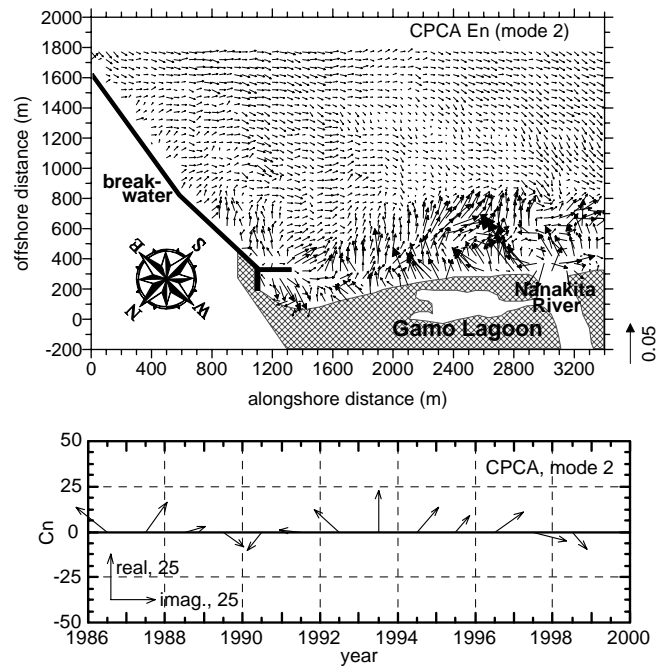
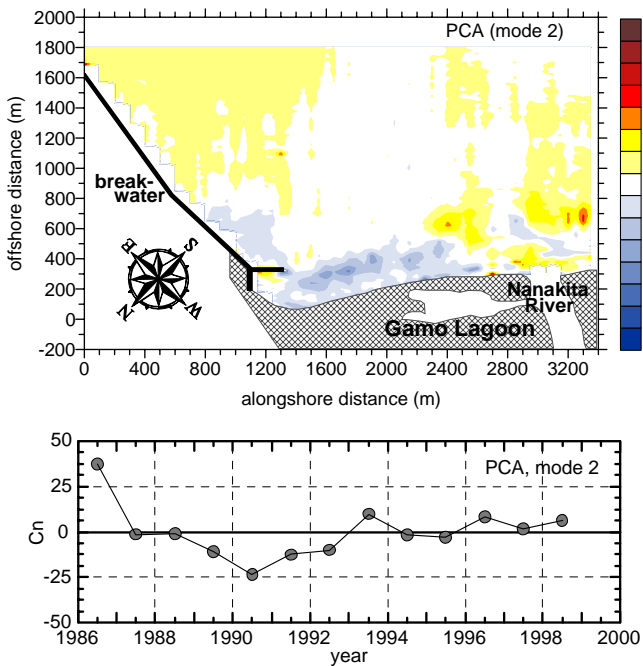


図-10 PCAによるモード2 (寄与率 24.1%) の固有関数 e_n の空間分布 (上) と時間関数 c_n の時系列 (下).

図-11 CPCAによるモード2 (寄与率 17.8%) の複素固有関数 e_n の空間分布 (上) と複素時間関数 c_n の時系列 (下).

られたモード1の固有関数 e_1 の空間分布 (上) と時間関数 c_1 の時系列 (下) を示したものである. CPCAから得られる e_n と c_n はともに複素値を取るため、図-9以降では、通常の複素平面表記とは異なるが、PCAの結果との比較を容易にするために、鉛直上向きに各関数の実部を、水

平右向きに虚部を表すようなベクトルとして e_n と c_n を表示している. まず、図-8を見ると、水深値に対して解析を行っているため、固有関数 e_1 がプラスの領域では、時間関数 c_1 が減少している期間は水深の減少を表すこととなるため堆積が、 c_1 の増加は水深の増加を表すことから侵食が、

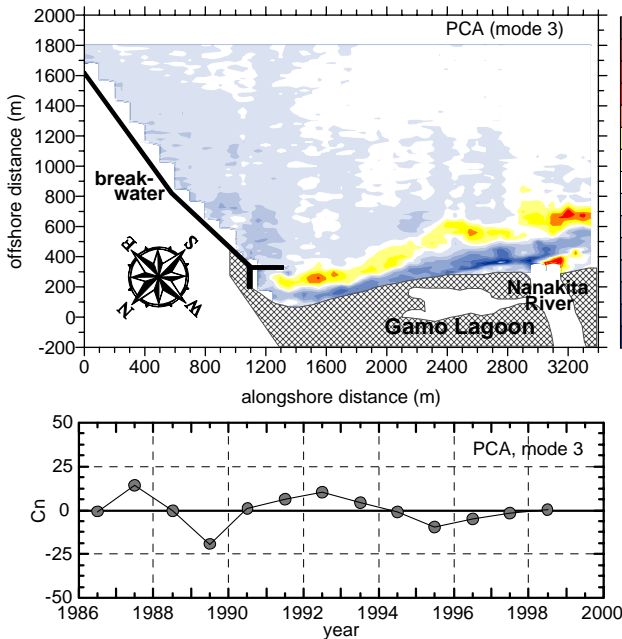


図-12 PCAによるモード3（寄与率8.1%）の固有関数 e_n の空間分布（上）と時間関数 c_n の時系列（下）。

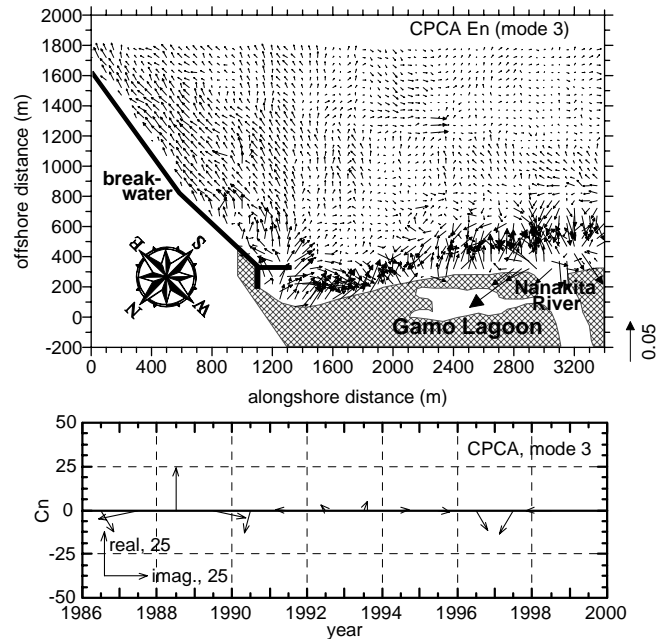


図-13 CPCAによるモード3（寄与率12.6%）の複素固有関数 e_n の空間分布（上）と複素時間関数 c_n の時系列（下）。

それぞれ生じていることになる。つまり、PCAの結果は c_1 が長期的に減少していることを示しているので、 e_1 が正值を取る南防波堤基部では長期的に堆積が生じていたことになる。

前述のように、この領域では1970年代から1980年代前半にかけては南防波堤の影響によって侵食が生じていたが（森下ら，1995），図-8および図-6より，1982年に完成した翼堤の効果が現れ始め，その結果，1980年代後半からこの領域が侵食域から堆積域に転じたことが分かる。一方，七北田川河口前面およびその両岸領域では， e_1 が負値を取ることから，短期的な堆積（1989，1994年）が生じつつも，長期的には侵食が生じていることが分かる。これは，河口テラスが徐々に縮退していることを示すものと考えられる。以上の結果は，防波堤基部における堆積と河口前面における侵食が同時進行的に生じていたことを表しており，PCAに特有の定在波動的な地形変動パターンが抽出されたものと判断される。なお，定義の関係で正負は逆ではあるが，図-8の e_1 と図-6のトレンドは極めて良く似た分布形状を呈している。

また，図-9は，河口前面で e_1 ベクトルの絶対値が大きいなど，定性的な傾向についてはPCAによる e_1 分布（図-8）とかなり良い対応を示しているように見える。しかしながら，地形変化や土砂移動を議論するためには複素数同士の乗算を行う必要があり，図-9を一見ただけで物理的な解釈を加えることは非常に困難である。

次にモード2の結果（図-10，図-11）を見ると，CPCA

（図-11）では河口域のやや北東側や浅海域で e_2 ベクトルの絶対値が大きいなどの傾向は見て取れるが，PCAによる結果（図-10）との間には明確な対応関係は見られない。一方，PCAでは（図-10），固有関数 e_2 の値は南防波堤基部から蒲生干潟前面にかけての砂浜域と，七北田川河口域では傾向が異なっており，時間関数 c_2 が減少する1986年から1991年にかけては，砂浜域では e_2 がマイナスなので堆積が，河口域では反対に侵食が生じており，1991年以降は両者の傾向が逆転することを表している。これは，あたかも河口域と砂浜域との間で土砂のやり取りがあって，そのため沿岸方向について重複波動的な地形変動が生じているかのようなパターンである。このような傾向はPCAモード1にも同様に見られ，振動周期は若干異なるものの，河口域と防波堤基部との間で定在波動的な地形変動が生じているように見える。このように，PCAにおいて複数のモードに跨って重複波動的な変動を生じる現象は，2.3.の図-3 (c-1)～(c-4)に見られたように，実際には進行波動的な現象が生じている可能性を示唆している。これについては，次節において詳細に検討する。

モード3の結果（図-12，図-13）はモード1やモード2のそれとは大きく異なっており，防波堤基部から河口前面までの広い領域において，PCA・CPCAともに汀線よりやや沖側の浅い領域において固有関数 e_3 の値が大きくなっている。特にPCAでは，汀線から100m～150m程度を境界

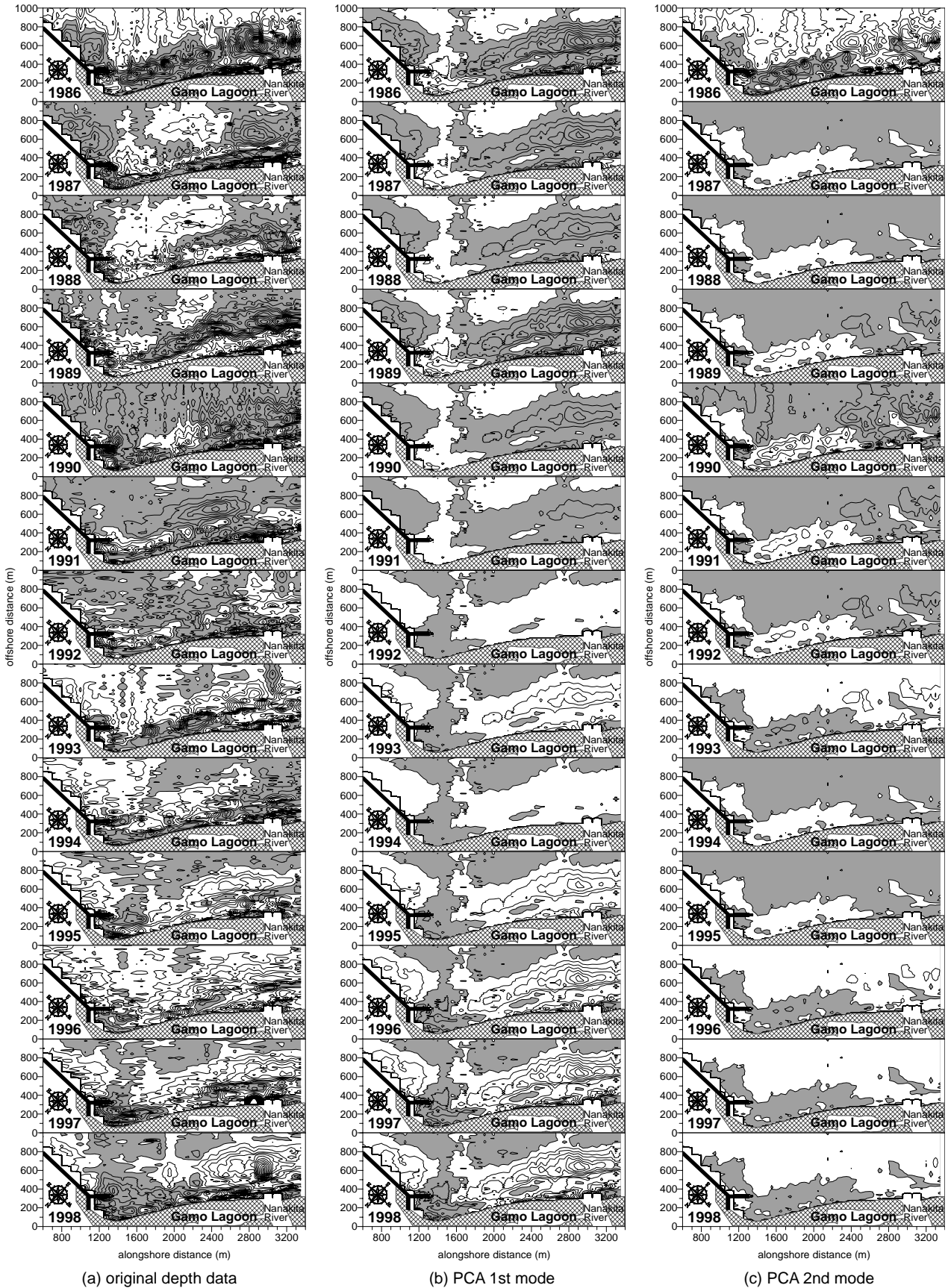


図-14 蒲生干潟前面海浜地形変動成分の時系列。(a) オリジナル地形, (b) PCA モード1 再合成地形, (c) PCA モード2 再合成地形。白：平均水深より深い領域, グレー：平均水深より浅い領域をそれぞれ示しており, コンター間隔はいずれも 0.2m である。

として e_3 の符号が岸沖で異なっている。加えて、時間関数 c_3 が5年程度の周期で正負が入れ替わるように変動していることから、これは地形が比較的周期的に岸沖方向に振動している現象を抽出したものと推察される。

4. 考察

4.1. 地形の再合成

主成分解析の結果から、PCAのモード1とモード2に、防波堤基部と河口域における定在波的地形変化が表れており、両者の固有関数分布も比較的類似していた。このことから、実際には、河口前面と防波堤基部との間で沿岸方向の土砂移動が生じている可能性が示唆された。このような進行波的な挙動は、CPCAであれば単一のモードで表現できるはずであるが、PCAでは手法上の制約により、モード1とモード2の2成分に分解されて表現されたものと推察される。そこで次に、このような進行波的な挙動を単一のモードで直接記述することのできるCPCAによる計算結果から、式(12)を用いてCPCAのモード1～3による再合成地形データを算出した。図-14はPCAモード1、モード2から求められる再合成地形データと、参考のためにオリジナルの地形データを、1986年から1998年まで時系表示しており、図-15も同様に、CPCAのモード1～3による再合成地形の時系列を示している。なおここでは、地形変化の大きい領域(図-5参照)である岸近くの領域のみを切り出して表示するとともに、地形変化のパターンを見やすくするため、図-4に示される12年間の平均水深を各地形データから引いた変動成分のみを示している。ここで、図-14、図-15ともに、白：平均水深よりも深い領域、グレー：平均水深より浅い領域を表しており、コンター間隔は0.2mである。

まず、オリジナルの地形データ(図-14(a))からは、河口前面の水深が経年的に深くなる(グレー→白)ことや、数年サイクルで汀線近傍の水深が変動することなどが読み取れるが、様々な現象が重なり合っているため非常に煩雑である。一方、PCAモード1による再合成結果(図-14(b))を見ると、南防波堤基部の翼堤付近では1986年から1998年にかけて一方的な堆積傾向(白→グレー)、南防波堤の沖側および干潟前面から河口にかけての領域は侵食傾向(グレー→白)にあることが分かる。同様にPCAモード2(図-14(c))では、翼堤～干潟前面の浅海域と、それ以外の沖側水域との間で数年サイクルの土砂交換が生じているような地形変動が確認される。これらの傾向は、当然ながら、図-8や図-9の固有関数から読み取られた傾向と同様であり、侵食域と堆積域がきれ

いに色塗りされて定在波的に振動するという、PCA特有の変化パターンが現れていると考えられる。

一方、CPCAによる再合成地形(図-15)はPCAとは様子かなり異なっており、モード1(図-15(a))では、1989年まで翼堤近傍に限定されていた深い領域(白)が、1990年以降徐々に干潟前面へ移動しており、1994年に一旦浅くなるものの、1995年からも同様に南西方向へ移動し続け、最終的には河口域まで到達している様子が見て取れる。これは、翼堤の影響によって北側領域では堆積傾向が進展し(白→グレー)、それに伴って浅い領域が沿岸方向に徐々に伝播し、河口部付近まで到達している様子、すなわち堆積域が河口方向へ移動している様子を捉えたものと解釈される。さらに、河口前面海域を見ると、この領域には当初テラス地形が形成されており、1989年頃までに成長し、その後は経年的に侵食されていることが分かる。つまり、CPCAのモード1は、河口テラス地形の発達・衰退過程に、南西方向への堆積域の移動が重なった地形変動を表現しているものと考えられる。

一方、モード2(図-15(b))からは、1987年～1989年に河口前面の沖合海域を中心として堆積域(グレー)が形成され、それが徐々に北方向へ広がり、時間の経過とともに沖側から消えていくパターンが、12年間で2回ほど繰り返されている様子が確認される。これは沖側から土砂が供給され、沿岸方向(この場合河口前面から防波堤方向)へ移流されながら、岸へ押し寄せてくるような現象を捉えたものであると解釈することができる。また、モード3(図-15(c))には水深2～3m以下の汀線近傍の領域と、そこより沖側領域との間で土砂が交互に移動するパターンが表れている。この変動は、バー・トラフ領域の移動に代表される岸沖漂砂による土砂移動を示すものと思われる。

翼堤部と河口部での堆積および侵食傾向は、PCAでは沿岸方向に関する定在波的な挙動として抽出されたが、堆積域の移動・伝播は、CPCAでしか直接的に見ることはできなかった。また、CPCAのモード2に表れた沖から岸へ向かう土砂移動パターンは、PCAモード2にやや似ているようにも思われるが、これもPCAでは定在波的な挙動として表現されているが、進行波的な現象であることを十分に表現することはできていなかった。これらの結果から、土砂の移流過程を含む現象に対してPCAは癖のある解析結果を示すこと、およびCPCAがこのような特徴を有する地形変化解析に際して、強力なツールとなる可能性があることが再確認される。

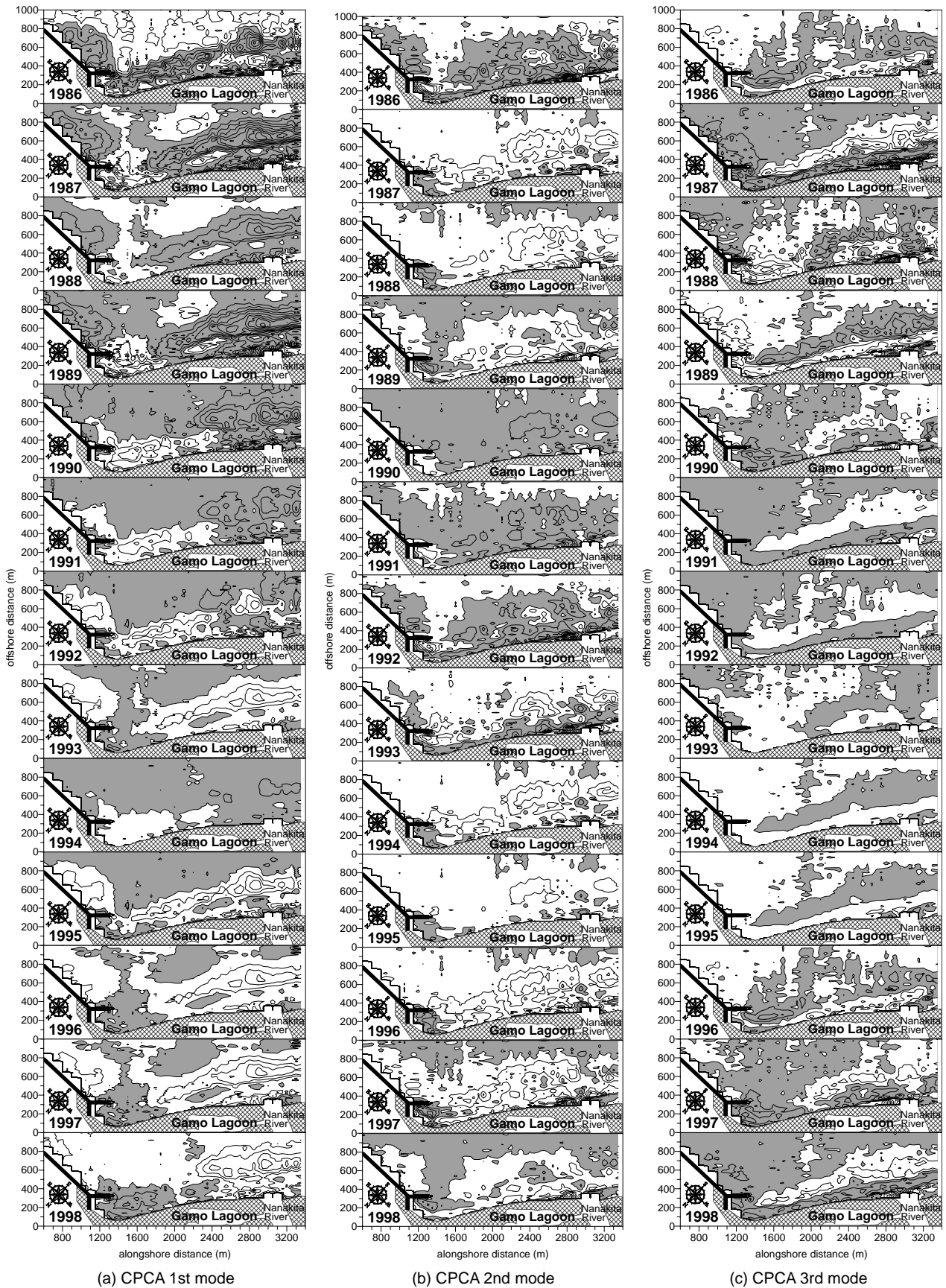


図-15 (a) CPCA モード 1, (b) CPCA モード 2, (c) CPCA モード 3 による再合成地形の時間変化 (1986 年～1998 年). 白: 平均水深より深い領域, グレー: 平均水深より浅い領域をそれぞれ示しており, コンター間隔はいずれも 0.2m である.

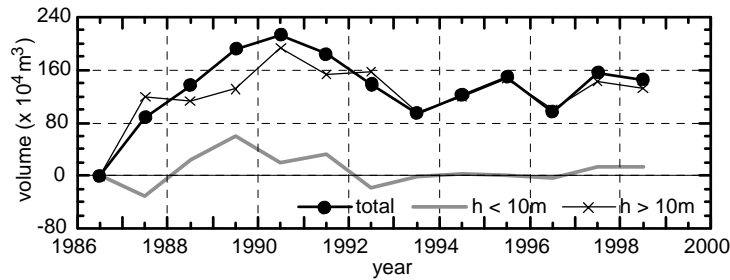


図-16 水深10mで領域を2分割した場合の土砂量変化と領域全体の土量変化（1986年基準）

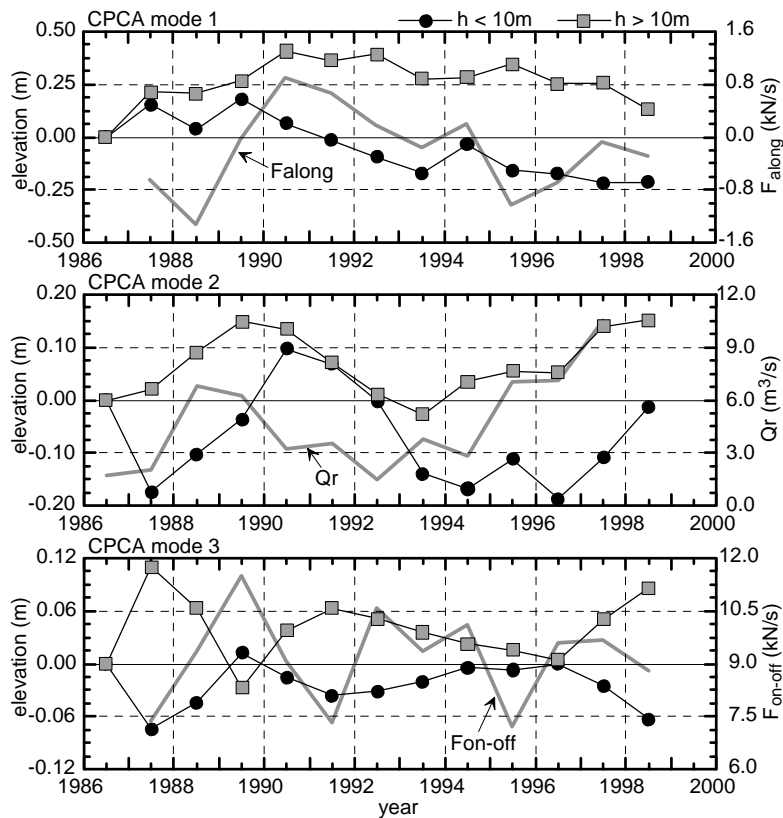


図-17 CPCAモード1～3による全領域および水深10m以浅・以深に分割された領域の空間平均水深の変動（1986年基準）と外力データとの比較. 上から, (a) CPCAモード1と波エネルギーフラックスの沿岸成分 F_{along} （北向き正）, (b) CPCAモード2と河川流量 Q_r , (c) CPCAモード3と波エネルギーフラックスの岸沖成分 F_{on-off} （岸向き正）.

4.2. 地形変動と外力との関係

次に、CPCAによって抽出された地形変動特性と、それを惹起する外力との関係について検討する。地形変化の標準偏差（図-5）やトレンド（図-6）からも明らかなように、地形変動量は水深10m程度よりも岸側で大きく、それよりも沖側では相対的に小さい。そこで、平均水深10mの等深線を境界として全領域を浅海域と深海域に2分割し、各海域における土量変化と外力との関係に着目して以降の解析を進めることとする。但し、上記のように分割すると、浅海域の面積は0.983 km²、深海域は3.267 km²となり、両者の差が大きいため、土量の形で比較した場合に

深海域の地形変動を過大評価してしまうことになる（図-16）。そこでここでは、CPCAによる再合成地形から求めた土量を領域面積で除算し、領域ごとの空間平均水深変化の形で評価する。

図-17は、以上のようにして求めたCPCAのモード1～3による領域ごとの水深を、1986年における領域平均水深からの偏差として時系列表示したものである。なお、図中には各モードに現れた変動と関係が深いことが予想される外力データを併せて示しているが、ここでは外力として波のエネルギーフラックスの沿岸成分 F_{along} と岸沖成分 F_{on-off} 、河川流量 Q_r を考え、それらと水深変化の対応関

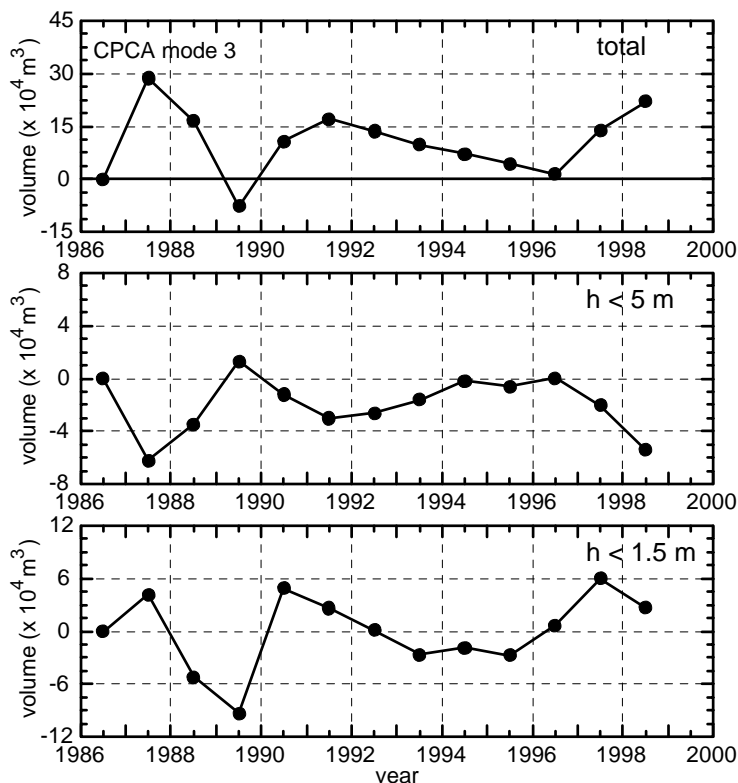


図-18 CPCA モード3による領域ごとの土量変化. (a) 全領域, (b) 水深5m以浅, (c) 水深1.5m以浅.

係を調べることにしている. なお, 波浪データについては, 1年間にわたってエネルギー平均された有義波高, 有義波周期, 波向きを用い, 屈折と浅水変形を考慮して沖波に換算した値からエネルギーフラックスを求め, Q_r については1年間の単純平均値を用いた. また, F_{along} は北向きを, F_{on-off} は岸向きを正と定義した.

まず, モード1による平均水深変動 (図-17 (a)) を見ると, 10m以浅では河口テラスの成長・衰退 (図-15 (a)) に対応して, 1990年頃までは堆積, その後は緩やかに侵食が進行しており, この傾向は図-17 (b) 中に示す河川流量の大小に概ね追従している. 期間中の波エネルギーフラックスの沿岸成分 F_{along} の卓越方向は南向き (つまり負値) であるので, この12年間の長期的・全体的な侵食傾向を説明することは可能ではあるが, F_{along} と土砂量変化との間の直接的な相関はそれほど高くはない. つまり, 対象海域では北側に構造物が存在するので, F_{along} が正 (北向き) の時に堆積が, 負の時に侵食が生じることが予想されるが, 必ずしもそのようにはなっていない. この不整合に関しては, 沿岸漂砂に対する南防波堤と河口テラス地形の影響を考えることによって説明される. まず, 南防波堤は汀線に対して北側に約120度傾いて突出しているため, 殆どの波は防波堤に対して北寄りに入射することになる. その結果, 森下ら (1995) も指摘しているよ

うに, 大部分の波浪は南防波堤に沿った南西向きの流れや反射波を駆動することになるため, この領域では南西方向への沿岸漂砂が常時卓越するものと考えられる. また, テラス地形が発達した1990年頃の状況を考えると, 等深線が沖へ突出することになるので, 多少波が斜めに入射しても河口の左岸側では北向き, 右岸側では南向きの沿岸漂砂が卓越することになる. また, 南防波堤基部は, 翼堤の影響に加えて河口部からの北向き漂砂によって堆積傾向にあるものと考えられる. すなわち, 本海域におけるモード1の土砂移動過程は, 防波堤基部の堆積傾向と, テラスの地形効果とその侵食に伴う河口からの南北両方向への土砂移動という過程から構成されており, 多少波向きが振れたとしてもそれらの機構は変わらないものと考えられ, そのため, 各年の F_{along} と土量変化とが1対1に対応していなかったものと推察される.

なお, CPCAのモード1による再合成地形に現れた南防波堤基部の堆積傾向 (図-15 (a)) は, 蒲生干潟及びその前面海浜の保全を考える上で重要な意味を持っている. この堆積傾向は, 1982年に完成した翼堤建設の効果によって1980年代に問題となっていた南防波堤基部の侵食 (森下ら, 1995) が一応止まり, 1990年以降は若干の堆積傾向にあることを示すものである. この堆積域は蒲生干潟前面海浜へ向けて徐々に拡大している様子も同時に

捉えられており、バリアー・アイランド上の越波による土砂流入の問題（田中・山内，1997）に対して少なからぬ影響を与えるものと考えられる。

一方、モード2による水深変動（**図-17 (b)**）を見ると、1～2年程度の位相差を持ちながら、河川流量 Q_r が増大すると堆積が生じ、反対に Q_r が減少すると侵食が進行している様子が明確に示されており、その変動周期は7年程度であることが分かる。しかも Q_r の変動に対しては、岸側より沖側の方が1年程度早くに応答していることから、モード2による地形変動は、**図-15 (b)**と併せて考えると、河川からの供給土砂のうち沖合へ流出したものが徐々に岸側へ移流される現象を表したものと解釈され、極めて大規模な岸沖方向の土砂移動が存在する可能性を示している。但し、その実態や発生メカニズムに関する検討を行うことは、今回のデータセットからだけでは不可能であり、今後更なる調査が必要であると認識している。

また、モード3による水深変動（**図-17 (c)**）を見ると、波エネルギーフラックス岸沖成分 F_{on-off} が相対的に大きいときは沖側で侵食、岸側で堆積が進行し、反対に F_{on-off} が小さくなると岸側で水深低下、沖側で堆積が同時に生じていることが分かる。なお、**図-18**にCPCAモード3による領域ごとの土量変化を示しているが、全領域の土量変化（**図-18 (a)**）は水深10m以深の水深変動とほぼ同様であり、 F_{on-off} が増大すると侵食、減少すると堆積する傾向にある。水深5m以下の領域（**図-18 (b)**）はそれとは反対の変動傾向を示しているが、さらに浅い汀線近傍の領域（水深1.5m以下、**図-18 (c)**）では F_{on-off} が大きければ侵食、小さければ堆積という変動をしている。これらの事実より、モード3の変動成分が岸沖漂砂による地形変動を表していることが再確認され、**図-17 (c)** などから、この岸沖漂砂による土砂移動の周期は約3～7年程度であることが読み取れる。

5. おわりに

5.1. 結論

本研究では、仙台湾蒲生干潟の保全のための重要な環境因子の一つである、七北田川河口部を含む前面海浜地形の変動特性について、主成分解析（PCA、あるいは経験的固有関数解析、経験的直交関数解析）および複素主成分解析（CPCA）を用いて解析した。以下に得られた主要な結論を述べる。

実際の地形データの解析に先立ち、PCAおよびCPCAをモデル変動地形に適用した場合の計算結果を示すことにより、両解析法の見地から海浜地形データへの適用性と出力諸特

性について検討した。その結果、CPCAは土砂の移流過程に代表される地形変動の進行波的な挙動を単一のモードで表現することができるのに対して、PCAでは複数のモードに分割され、しかも重複波的な変動の重ね合せとして表現されることを具体的に示した。しかしながら、CPCAにはHilbert変換に含まれるFourier級数展開のため、一様侵食等の単調な現象に対して、固有関数の分布や時系列に歪みを生じさせることを示し、解釈に際しては若干の注意が必要であることを喚起した。

次いで、蒲生干潟前面海浜地形の中期変動特性に関する検討を行い、複素主成分解析（CPCA）によって土砂の移動経路や変動周期等の諸特性を抽出することに成功した。外力データとの照合の結果、対象海域全体の土砂収支に対しては、河口テラスの発達・衰退が最も寄与しており（モード1）、次いで河川から沖合海域へ流出する土砂の系内への再流入（モード2）、岸沖漂砂による土砂移動（モード3）が関与していることが分かった。

また、CPCAのモード1による再合成地形を照査した結果、1982年に完成した翼堤建設の効果により、1980年代に問題となっていた南防波堤基部の侵食（森下ら，1995）が止まり、1990年以降は若干の堆積傾向にあることが明らかになった。この堆積域が蒲生干潟前面海浜へ向けて徐々に拡大している様子も同時に捉えられており、バリアーアイランド上の越波による土砂流入の問題（田中・山内，1997）に対して少なからぬ影響を与える可能性を示唆した。

5.2. 今後の課題

本海域の土砂収支・海浜地形変化に対しては、河口テラスの縮退、河川から沖へ排出された土砂の系内への再流入、岸沖漂砂、という3つの機構が支配的な因子となっていた。蒲生干潟の生態環境に多大な影響を与える地形変化はCPCAのモード1に現れており、テラス地形の経年的な縮退は河口閉塞と密接に関連し、また、翼堤部から進行しつつある河口方向への堆積傾向は越波の軽減につながるものと思われる。以上の2点から、蒲生干潟に対する海洋からの環境インパクトは縮小していく傾向にあると言える。しかしながら、河道の掘削や砂利採取などの人為的影響も無視し得ない可能性があり、閉塞した河口部の出水時のフラッシュアウトや台風などによる一時的な大規模海浜侵食など、イベント的な現象も重要であると考えられる。今後は、周辺の深浅測量を継続して行うとともに、調査対象を七北田川河口部～蒲生干潟内部へ拡大し、気象・海象データについても継続してモニタリングしていくことが望ましい。また、実態調査、現地観

測, 数値シミュレーション等を通じて, 現場海域の波浪, 流況をより詳細に明らかにするとともに, 海浜地形と越波量や河口閉塞と水理環境との直接的な関係を調査することによって, 蒲生干潟内の環境に及ぼす海洋の影響について検討していくことが必要となるものと考えている。

(2002年2月14日受付)

謝辞

解析に用いた深淺データは国土交通省東北地方整備局塩釜港湾空港工事事務所, 波浪データは港湾空港技術研究所海象情報研究室, 河川流量データは宮城県土木部からご提供いただいたものである。地形変動や漂砂特性の解釈に際して, 港湾空港技術研究所の加藤一正監事および中村聡志底質環境研究室長に貴重なご助言を頂いた。高橋重雄海洋・水工部長には論文の構成に関してご助言いただいた。主成分解析プログラムの作成にあたっては, (株) エコーの李 在炯氏(元漂砂研究室)にご助言頂いた。また, 図面の作成に際しては, 波多野敦史氏(元漂砂研究室実習生, 現株式会社ライト工業)に多大なるご助力を頂いた。末筆ながらここに付記し, 深甚なる感謝の意を表す次第であります。

参考文献

- 上原忠保 (1984) : 蒲生干潟における塩分の侵入と交換に関する研究, 第28回水理講演会論文集, pp.67-73.
- 宇多高明, 小俣 篤, 峯松麻成 (1990) : 仙台湾沿岸における砂浜消失の危機, 海岸工学論文集, 第37巻, pp.479-483.
- 加藤一正, 吉松 晃 (1984) : 三次元の経験的固有関数による深淺図解析法, 港研報告, Vol.23, No.2, p.27-47.
- 北野利一, 中野 晋, 岡 彰紀, 間瀬 肇 (1999) : 主成分解析による新たな地形変動分析法に関する理論的検討, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.626-630.
- 栗原 康 (1980) : 干潟は生きている, 岩波書店, 219p.
- 栗山善昭, 李 在炯 (2000) : 複素主成分分析を用いた沿岸砂州の変動特性の解析, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.616-620.
- 佐藤昭二, 庄子忠夫, 田中則男 (1966) : 仙台湾沿岸の漂砂について, 第13回海岸工学講演会論文集, pp.176-182.
- 田中茂信, 山本幸次, 鴨田安行, 柳町俊章, 小野松輝美, 後藤英生 (1995) : 仙台湾南部における土砂移動機構の観測, 海岸工学論文集, 第42巻, pp.666-670.
- 田中則男 (1983) : 日本沿岸の漂砂特性と沿岸構造物築造に伴う地形変化に関する研究, 港研資料, No.453, 148p.
- 田中 仁 (1995) : 七北田川において観測された中小河川特有の河口現象, 土木学会論文集, No.509/II-30, pp.169-181.
- 田中 仁, 山内健二 (1997) : バリアー・アイランド上の

- 越波によるラグーン内での土砂堆積, 海岸工学論文集, 第44巻, pp.646-650.
- 森下保壽, 高橋次郎, 川又良一, 坂井隆行, 片野明良 (1995) : 構造物の反射波による海浜地形の制御効果, 海岸工学論文集, 第42巻, pp.711-715.
- 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高浜地形解析, 海岸工学論文集, 第45巻, pp.571-575.
- Arbrey, D.G. (1979) : Seasonal patterns of onshore/offshore sediment transport, *J. Geophys. Res.*, Vol.84, No. C10, pp.571-575.
- Arbrey, D.G., Inman, D.L. and Winant, C.D. (1980) : The statistical prediction of beach changes in Southern California, *J. Geophys. Res.* Vol. 85, No. C6, pp.3264-3276.
- Barnet, T.P. (1983) : Interaction of monsoon and Pacific trade wind systems at interannual time scale, Part I: The equatorial zone, *Monthly Weather Review*, Vol. 111, pp.756-773.
- Bosma, K.F. and Darlymple, R.A. (1996) : Beach profile analysis around Indian River Inlet, Delaware, USA, *Proc. 25th Coastal Eng. Conf.*, ASCE, pp.401-405.
- Horel, J.D. (1984) : Complex principal component analysis: Theory and examples, *J. Climate Appl. Meteor.*, Vol. 23, pp.1660-1673.
- Kroonenberg, P.M. and DeLeeuw, J. (1980) : Principal component analysis of three-mode data by means of altering least square algorithms, *Psychometrika*, Vol. 45, No. 1, pp.69-97.
- Kuriyama, Y. and Lee, J.-H. (2001) : Medium-term beach profile change on a bar-trough region at Hasaki, Japan, investigated with complex principal component analysis, *Proc. of Coastal Dynamics 2001*, ASCE, pp.959-968.
- Liang, G. and Seymour, R.J. (1991) : Complex principal component analysis of wave-like sand motions. *Proc. Coastal Sediments '91*, ASCE, pp.2175-2186.
- Liang, G., White, T.E. and Seymour, R.J. (1992) : Complex principal component analysis of seasonal variation in nearshore bathymetry, *Proc. 23rd Coastal Eng. Conf.*, ASCE, pp.2242-2250.
- Ruessink, B.G., Holman, R.A. and Wijnberg, K.M. (2001) : Interannual nearshore bar behaviour: an inter-site comparison, *Proc. of Coastal Dynamics 2001*, ASCE, pp.646-655.
- Seymour, R.J. (1989) : Cross-shore transport. In: *Nearshore Sediment Transport*, Ed., R.J. Seymour, Plenum Press, New York, pp.273-286.
- Wallace, J.M. and Dickson, R.E. (1972) : Empirical orthogonal representation of time series in the frequency domain, Part I. Theoretical considerations, *J. Appl. Meteor.*, Vol.11, pp.887-892.
- Winant, C.D., Inman, D.L. and Nordstrom, C.E. (1975) : Description of seasonal beach change using empirical eigenfunctions, *J. Geophys. Res.*, Vol.80, No.15, pp.1979-1986.