

複素主成分分析による波浪エネルギーフラックスが 海浜変形へ及ぼす影響の解析

Complex Principal Component Analysis on Effects of Wave Energy
Fluxes on Beach Topographic Changes

横木裕宗¹・塙 尚幸²・三村信男³

Hiromune YOKOKI, Naoyuki HANAWA and Nobuo MIMURA

Complex principal component analysis (CPCA) was applied to the bottom topographic data surveyed on Ajigaura and Tokai coast in Ibaraki prefecture, in order to detect the features of topographic changes and the correlations between the changes of bottom topography and energy fluxes of the incident waves. The method for incorporating wave data into bottom sounding data was proposed in this study. The results obtained in the study confirmed the applicability of CPCA to analyze the beach topographic changes as well as the effects of wave energy fluxes on the topographic changes.

1. 序 論

近年, 海浜変形のモニタリングが積極的に実施されるようになり, 長期間にわたって定期的に測量された深淺測量データが蓄積されるようになってきた。これらを統計的に解析にすることにより, 現在までの海浜地形変化の傾向の把握と今後の予測を行えるものと期待される。深淺測量データを統計的に解析する方法の一つとして, 経験的固有関数展開法, あるいは主成分分析と呼ばれる方法がある。これらは各地点の水深変化を空間関数と時間関数の積に展開して, 空間的, 時間的な変化の特徴を抽出する方法である (例えば, Winant ら, 1975; 加藤・吉松, 1984; 栗山, 2006 など)。また, 水深変化にそのヒルベルト変換を虚数部として加えて複素水深を導入し, それらに主成分分析を行う複素主成分分析 (Complex principal component analysis; CPCA) もある (例えば, Liang・Seymour, 1991; Bosma・Dalrymple, 1996; 横木ら, 1998; 横木・Larson, 2002)。複素主成分分析の特徴は, 水深を複素数として扱うことにより, 空間的に特徴的な地形が進行波のように移動する様子を捉えることができることである。

本研究では, 茨城県中部に位置する阿字ヶ浦および東海地区海岸という比較的広域の海岸を対象に CPCA を行った。阿字ヶ浦海岸および東海地区海岸では, 両海岸の間に建設されている常陸那珂港の影響で, 近年沿岸漂砂

が一方に卓越し, その結果として激しい海岸侵食が見られている (例えば, 宇多, 2004; 横木ら, 2003 など)。これらの海岸では, 常陸那珂港の建設開始当初から海浜変形のモニタリングおよび海岸侵食対策の一環として, 約 20 年間にわたって定期的に深淺測量が実施されてきた。

深淺測量データを対象とした CPCA では, 地形変化の傾向・特徴を取り出せるが, それだけでは変化の要因を検討することはできない。そこで本研究では, 深淺測量データに波浪データを取り込み, それらをまとめて CPCA を行うことで, 地形変化の特徴のみならず, 波浪場の変化との関係や要因分析を行うことを目的とした。さらに, 近年阿字ヶ浦海岸を中心にこれまで実施されてきた侵食対策 (南ら, 2005) の効果がどのように深淺測量データに表れているか, それを CPCA で抽出できるのかについても検討を行った。

2. CPCA による深淺測量データの解析

(1) CPCA による空間・時間関数展開

まず Liang・Seymour (1991) と同様に, 実水深 $h(x, t)$ を拡張して, 複素水深 $H(x, t)$ を定義する。実際の深淺測量においては, 測量地点, 時刻が離散的かつ有限なので, 地点 x_i , 時刻 t_j における複素水深を $H_{ij} = H(x_i, t_j)$ と表すと, 次式のように H_{ij} を成分とする行列を定義できる。これを複素水深行列と呼ぶ。

$$H = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & \cdots & H_{1n_t} \\ H_{21} & H_{22} & \cdots & H_{2n_t} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ H_{n_x 1} & H_{n_x 2} & \cdots & H_{n_x n_t} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで, n_x, n_t はそれぞれ, 測量地点数, 測量回数を表している。ここで, 加藤・吉松 (1984) に倣い平面的

1 正 会 員 博(工) 茨城大学准教授 広域水圏環境科学教育研究センター
2 学生会員 茨城大学大学院理工学研究科都市システム工学専攻
3 正 会 員 工博 茨城大学教授 広域水圏環境科学教育研究センター

に分布した測量地点が擬似的に一測線上にあると見なしている。同様に、第 n モードの変化を表す空間関数、時間関数を、それぞれ、 n_x 、 n_t 個の要素を持つベクトルとして次式のように定義できる。

$$\begin{aligned} e_n &= (e_{n1} \ e_{n2} \ \cdots \ e_{nn_x}) \\ c_n &= (c_{n1} \ c_{n2} \ \cdots \ c_{nn_x}) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、空間関数と時間関数を用いて複素水深行列を次式のように表すことができるとする。

$$H = \sqrt{\lambda_1} e_1 c_1 + \sqrt{\lambda_2} e_2 c_2 + \cdots \quad (3)$$

e_n 、 c_n はそれぞれ互いに直交する、長さ 1 のベクトルであるとする。左肩の添え字 t は転置行列または転置ベクトルを表す。また、係数 $\sqrt{\lambda_n}$ は各モードの重み（振幅）を表している。CPCA では、この式を満足する e_n 、 c_n 、 λ_n が、複素水深行列から計算される、複素水深の分散共分散行列の固有値、固有ベクトルを求めることによって得られる（横木・Larson, 2002）。

(2) モード寄与率・局所寄与率

重み係数 λ_n は、各モードが表す水深変化量（分散）が実際的水深変化をどの程度よく表しているものかを表している。これを用いて各モード毎の全領域平均の寄与率（モード寄与率） Λ_n を次式のように計算できる。

$$\Lambda_n = \frac{\lambda_n}{\sum_k \lambda_k} \quad (4)$$

また、各地点毎の水深変化量が各モードによってどの程度良く表されているのかを表す指標として、局所寄与率がある。これは重み係数と空間関数を用いて次式のように表される（横木・Larson, 2002）。

$$\mu_n = \frac{\lambda_n |e_{ni}|^2}{\sum_k \lambda_k |e_{ki}|^2} \quad (5)$$

局所寄与率を用いることにより、領域全体を水深変化パターンが似ているいくつかの小領域に分けて議論することができる。

3. 阿字ヶ浦・東海地区海岸への適用

阿字ヶ浦海岸および東海地区海岸では、1973 年から数年おきに、そして常陸那珂港建設開始前年の 1988 年からはほぼ毎年 2 回深浅測量が実施されている。本研究では、阿字ヶ浦海岸、東海地区海岸の両海岸で深浅測量がほぼ同時に実施されているデータ 33 回分（1973 年～2006 年）を抽出し解析に使用した。解析に際しては、欠測地点の水深を周辺の水深から線形補間で求めた。その結果解析測点数は合計 8852 個であった。また、ヒルベルト変換を行うための高速フーリエ変換を行うために、時間方向のデータ数が 2 のべき乗（本研究では 64 個）となるよう、適宜補間を行った。

図-1、2 に深浅測量データから得られた全期間合計の侵食域、堆積域を示した。阿字ヶ浦海岸の南部、東海地

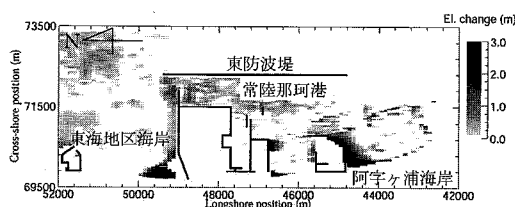


図-1 深浅測量データから得られた侵食域

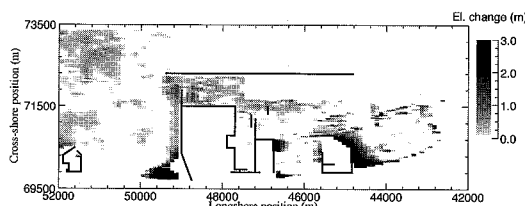


図-2 深浅測量データから得られた堆積域

区海岸の中・北部で激しい侵食域がみられ、阿字ヶ浦海岸の北部、東海地区海岸の南部（常陸那珂港周辺）では堆積が顕著となっていることが分かる。

4. CPCA による解析結果

(1) 阿字ヶ浦・東海地区海岸全体を対象とした解析

まず、深浅測量データセット全体を対象に CPCA を行った。図-3 に、得られた空間関数の第 1 モード（モード寄与率：67.6%）を示した。空間関数は複素数なので、図の横軸方向に実数部、縦軸方向に虚数部を取りベクトルとして表示した。また煩雑を避けるために、最大値（絶対値）の 10% 以上の大きさのもののみを示した。この図から、空間関数の絶対値の大きな領域は、図-1、2 の侵食域および堆積域の両方に対応していることが分かる。また、第 1 モードの局所寄与率の高い領域を図-4 に示した。この図からも、図-1、2 の顕著な侵食・堆積域は第 1 モードではほぼ表現できていることが分かる。次に第 1 モードの地形変化の時間的な推移をみるため、時間関数を図-5 に示した。時間関数も複素数なので、上図に絶対値を下図に偏角の時間変化を示した。この図から、第 1 モードの時間関数は絶対値が 1998 年にかけて上昇し、その後下降している。偏角は、1993 年頃を境にそれまではほぼ一定だったのが減少傾向に転じている。これらは、常陸那珂港の東防波堤の建設に伴い、1993 年頃を境に汀線付近で激しい海岸侵食が観察されるようになった（横木ら, 2003）のことに符合している。

(2) 海岸毎に分けた解析

次に、解析範囲を阿字ヶ浦海岸、東海地区海岸のそれぞれに限定して CPCA を行った。これは、解析範囲を小さくすることで、広い範囲を対象に解析した場合と比較して、結果が異なり、より詳細に地形変化の特徴を抽

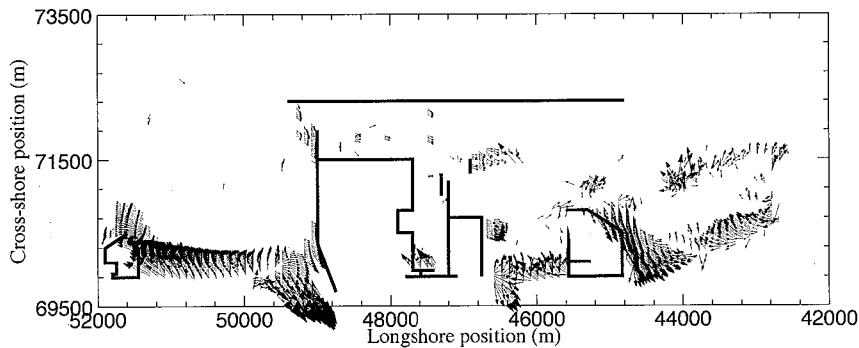


図-3 空間関数 (第1モード)

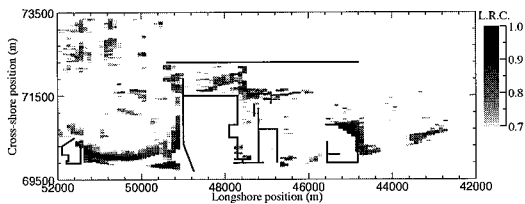


図-4 第1モードの局所寄与率が高い領域

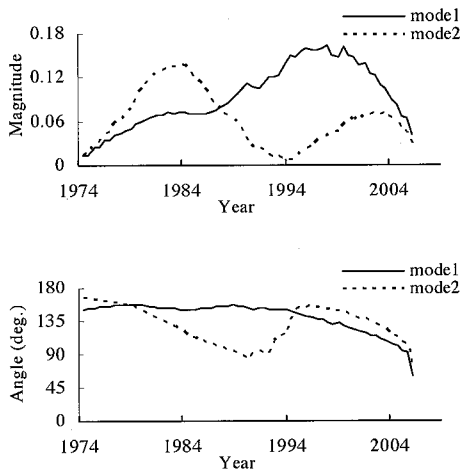


図-5 時間関数 (阿字ヶ浦・東海地区海岸全体を対象とした解析)

出できるのかを検討したものである。

図-6は、阿字ヶ浦海岸を対象としたCPCAによって得られた第1モードの空間関数(モード寄与率:58.5%)である。図-3と比較すると、分布状況、相対的な大きさはさほど変わらない。また、時間関数を図-7に示した。図-5と比較しても、第1モードの結果はほとんど変わらないことが分かる。さらに空間関数、時間関数を合わせた検討を行った結果、第1モードに関する限り、対象領域を2つの海岸全体にしようが、別々に設定しようが同様の結果が得られることが分かった。このことは、CPCAが解析領域の大きさの影響を受けにくい、よい解析法であることを示している。

一方、第2モードはそれぞれの海岸での地形変化の特徴を反映して、多少異なる結果となった。阿字ヶ浦海岸では全体を対象とした場合より第2モードの寄与率が大きくあり、東海地区海岸では小さくなる結果となった。しかし、地形変化のパターンは、全体を対象として得られた結果と同じであった。

(3) 期間を限定した解析

また、深浅測量を密に実施されるようになった1984年以降のデータのみを対象にCPCAを行った。これは、解析期間の取り方がCPCAの結果にどのように影響するかを検討したものである。

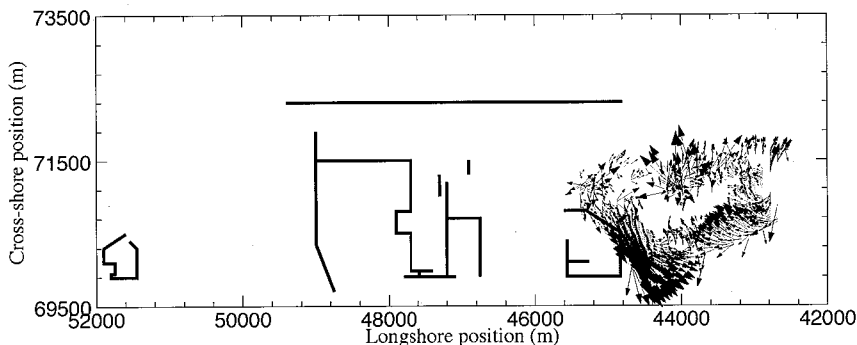


図-6 空間関数 (第1モード; 阿字ヶ浦海岸を対象とした解析)

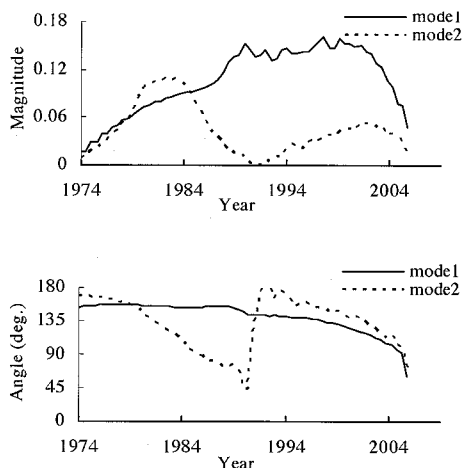


図-7 時間関数 (阿字ヶ浦海岸を対象とした解析)

その結果、全期間を対象としたCPCA とほぼ同じ解析結果が得られた。そして、第1モードのモード寄与率が71.6%に若干上昇した。これは、期間を短くして解析を行うことで、その期間の詳細な変化が検出されるというよりは、むしろ全期間を対象として得られた結果が強調されることとなった。上述の海岸を分けて解析した結果と合わせて、このこともCPCA 解析のよい性質を示していると考えられる。

(4) 侵食対策工の効果の検出

2003 年以降実施されている離岸堤、突堤などの侵食対策工による侵食低減や砂浜回復などの効果は、本研究で用いた深浅測量データによって確認することはできたが、CPCA による空間関数・時間関数では明確に確認できなかった。これは対策を始めてからの期間が相対的に短いこと、効果が現れた範囲がまだ限定的であり、時間的、空間的に範囲を限定して行ったCPCA でもなお、他の地点の地形変化に紛れてしまったことが原因として考えられる。今後モニタリングを継続的に行うことで効

果を測定できるものと期待される。

5. 波浪エネルギーフラックスを含めた解析

(1) 波浪エネルギーフラックスデータの変換

本研究で入手した波浪データは、1984 年以降、2 時間毎に観測された有義波高、有義波周期である。まず、これらを約半年に 1 回の深浅測量データと同等のデータに変換した。地形変化に影響を与えるものとして、各時間毎の波高、周期からエネルギーフラックスを計算した。そしてそれらを深浅測量データの時間間隔である半年毎に区切り、大きい方から 30% を取り出し平均値を算出した。その際観測された波向きをもとに北寄りと南寄りに分けた平均も求めた。

次に、それぞれを架空の地点の水深データと見なせるよう、時間平均を差し引き、変動量(分散)を、地形変化(水深変化)の分散の平均値と同じになるように調整した。

(2) 解析結果

図-8 に、阿字ヶ浦海岸の深浅測量データに波浪エネルギーフラックスを加えたものを対象に行ったCPCA によって得られた第2モード(モード寄与率: 13.8%)の空間関数を示した。図に示すように、波浪エネルギーフラックスデータは、北寄り、南寄り、合計の3種類のデータを3地点に設定した。局所寄与率を調べると、阿字ヶ浦海岸を対象とした解析では、波浪エネルギーフラックスは第2モードで表されるような変化していることが分かった。これは、支配的な地形変化と波浪場の変化が異なっていることを示している。

そこで、第2モードの局所寄与率の高い地点を選び、波浪エネルギーフラックスとの関連を検討した。図-9 に、点(43780, 71360)における地形変化とそれぞれの波向きの波浪エネルギーフラックス(EF)を示した。これらの図から、この地点では、1994 年以降北寄りの波浪エネルギーフラックスの変化と地形変化がほぼ一致

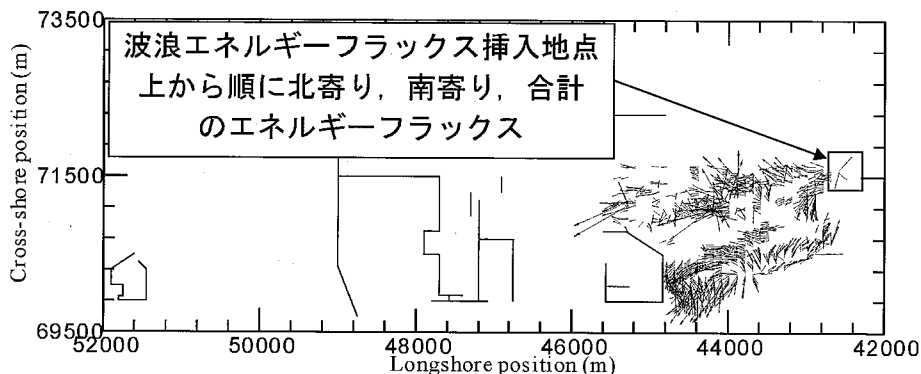


図-8 空間関数モード2 (EFあり, 阿字ヶ浦海岸)

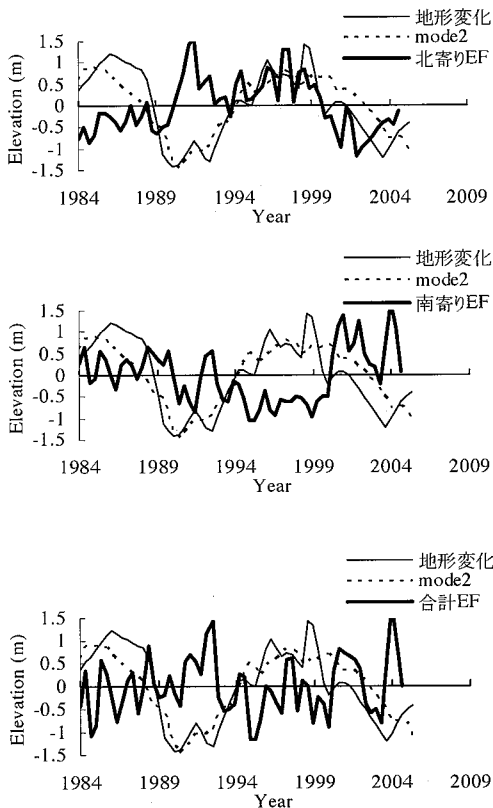


図-9 地形変化と波浪エネルギーフラックス
(43780, 71360)

した傾向を示していることが分かる。そしてこれは南寄りのものの変化とちょうど逆位相である。これは、南寄りの高波浪が来襲すると侵食するという傾向を表していることとなる。そして、第2モードの局所寄与率の高い領域を抽出したところ、阿字ヶ浦海岸の沖合の領域が該当することが分かった。この領域では、地形変化に及ぼす波浪場の影響が比較的大きいといえる。

6. 結 論

本研究では、阿字ヶ浦海岸・東海地区海岸を対象として複素主成分分析により海浜地形変化の特性を解析した。以下に本研究で得られた主な結論を示す。

- 阿字ヶ浦海岸・東海地区海岸を対象とした解析で、その第1モードが主な侵食・堆積域を表しており、それが常陸那珂港の建設時点から生じていることが示され

た。

- 複素主成分分析の分析対象領域、対象期間を変えても、得られる第1モードの空間・時間関数は、変わらないことが分かった。
- 波浪場の変化と地形変化の相関を検討するため、波浪データを深浅測量データに取り込んで解析した。その結果、波浪場の変化は第2モードとして検出され、波浪場と同様の変化が生じている領域を確認できた。
- 最近実施された侵食対策工による効果は、複素主成分分析では確認できなかった。今後さらに深浅測量データが蓄積されることで可能になると期待される。

謝辞：本研究を遂行するに当たり、茨城県常陸那珂港湾事務所には深浅測量、および波浪データをご提供頂きました。ここに記して深甚なる謝意を表します。

参 考 文 献

- 宇多高明(2004)：海岸侵食の実態と解決策，山海堂，pp. 77-84。
- 加藤一正・吉松 晃(1984)：三次元の経験的固有関数による深浅図解析法，港湾技術研究所報告，第23巻，第2号，pp. 27-47。
- 栗山善昭(2006)：海浜変形—実態，予測，そして対策—，技報堂出版，pp. 133-142。
- 南 陽介・横木裕宗・三村信男(2005)：沿岸漂砂量の岸沖分布を考慮した海岸線変化モデルの構築と阿字ヶ浦海岸への適用，海岸工学論文集，第52巻，pp. 541-545。
- 横木裕宗・南 陽介・信岡尚道(2003)：阿字ヶ浦海岸における最近の急激な海岸侵食の実体解明，海岸工学論文集，第50巻，pp. 526-530。
- 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，海岸論文集，第45巻，pp. 571-575。
- 横木裕宗・Magnus Larson(2002)：複素主成分分析を用いた Sylt 島海岸における地形変化特性の解析，海岸工学論文集，第49巻，pp. 601-605。
- Bosma, K. F. and R. A. Dalrymple(1996)：Beach profile analysis around Indian River Inlet, Delaware, U.S.A., Proc. 25th ICCE, ASCE, pp. 2829-2842。
- Liang, G. and R. J. Seymour(1991)：Complex principal component analysis of wave-like sand motions, Coastal Sediments '91, ASCE, pp. 2175-2186。
- Winant, C. D., D. L. Inman, and C. E. Nordstrom(1975)：Description of seasonal beach changes using empirical eigenfunctions, Journal of Geophysical Research, Vol. 80, No. 15, pp. 1979-1986。