

蒲生干潟前面海浜地形の中期変動特性

内山 雄介*・栗山 善昭*・波多野敦史**

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、底生生物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。

既往の研究によると、蒲生干潟前面海浜を含む仙台湾沿岸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)、仙台湾近傍では 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、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)。また、仙台湾では水深約 18 m 程度の沖合海域でも有意な土砂移動が生じているという報告もあり(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のが現状である。一方、蒲生干潟は、昭和 40 年代の仙台湾建設に伴う七北田川旧河口の締め切りによって取り残された水域が発達した潟湖であり、新河口部では、現在も河口閉塞の問題がしばしば顕在化している(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合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 年間の深浅測量データに対して主成分解析を適用し、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た。さらに、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ので、その結果について報告する。

2. 調査概要および解析手法

深浅測量は、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、仙台湾北部の七北田川河口右岸側から仙台湾南防波堤にかけての沿岸距離約 3 km、塩釜港工事基準面(D.L.=T.P. -0.84 m) - 18 m 強の沖合海域から D.L. + 3 m の後浜にかけての岸沖距離約 2 km の範囲で深浅測量が実施された。水深データは、沿岸方向に 50 m 間隔、岸沖方向に 10 m 間隔でデジタルデータとして整理されている。鉛直座標系は、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、仙台湾沖水深 20 m 地点の波浪データ、および七北田川約 15 km 地点の市名坂における流量データを使用した。

得られた深浅測量結果に対し、主成分解析(あるいは経験的固有関数法。以下、「PCA」と表記)および複素主成分解析(経験的複素固有関数法。以下、「CPCA」)を適用した。PCA、CPCA は時間的に変動する空間分布データを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する解析手法であり、地球物理分野で広

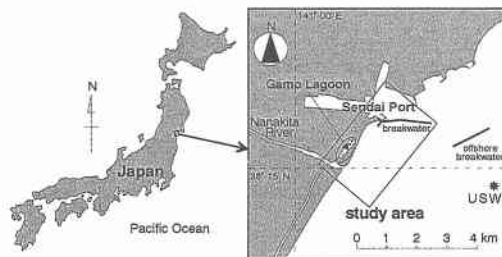
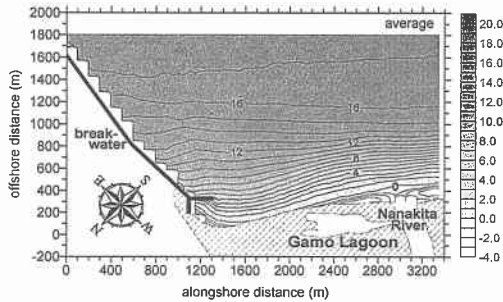
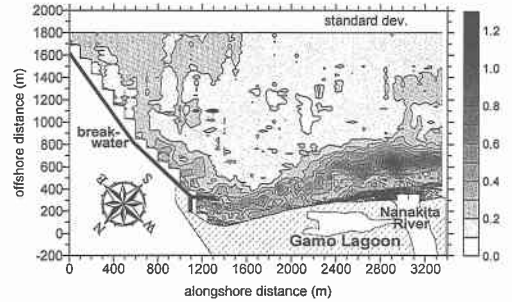


図-1 現地調査実施海域(宮城県七北田川河口右岸側より仙台湾南防波堤まで)

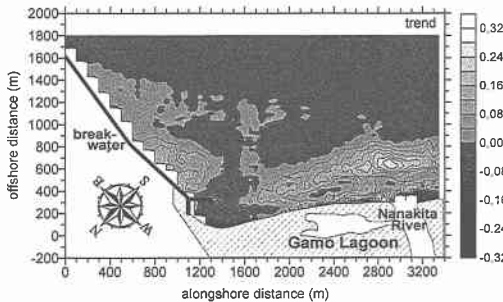
* 正会員 博(工) (独)港湾空港技術研究所 海洋・水工部漂砂研究室
** 正会員 ライト工業(元漂砂研究室実習生)



図一2 平均水深 (コンター間隔: 1 m)



図一3 水深変動の標準偏差 (コンター間隔: 0.1 m)



図一4 水深変化トレンド (コンター間隔: 0.04 m/y)

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 (例えば, PCA: Winant, *et al.*, 1974, CPCA: Liang and Seymour, 1991), その有効性が確認されている。このうち 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), 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。

3. 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基本的な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、それぞれ図一2～図一4 に示す。このうちトレンドは、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。最沖部の平均水深は 18 m 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。水深約 10 m 以下の浅海域の等深線は概ね汀線に平行であり、河口部ほど間隔が密になっているが、図一4 のトレンドから、この領域では侵食が進行していることが分かる。また、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 3～10 m の範囲と 3 m 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 0 m 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。

4. 主成分解析

4.1 解析方法

次に、以上のように明らかにされた地形変動の特徴をより精緻に検討し、さらにその原因を考察するべく、深浅データに対して PCA および CPCA を適用する。

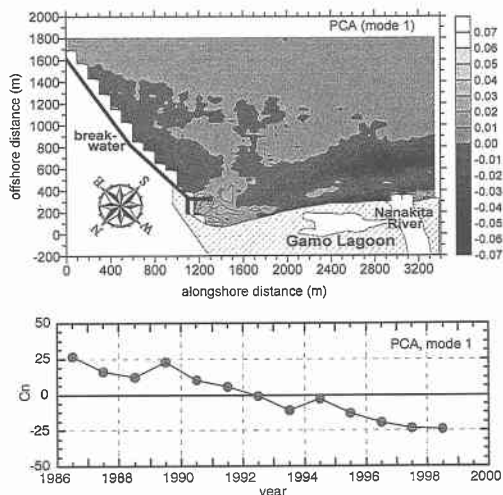
PCA, CPCA は、水深データの変動成分 $h(x, y, t)$ から空間と時間に関する直交関数 $e_n(x, y)$, $c_n(t)$ を経験的に決定し、これらを用いて h を次式のように表現しようとするものである。

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

ここで、 h'_n は PCA, CPCA により分解された h を、添字 n は各関数が元データの第 n 主成分であることを表しているが、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。また、CPCA では各関数が複素値を取るの、 $e_n(x, y)$ の代わりにその共役複素数を用いて上式を計算し、実部を取り出すことによって実際の地形データを再合成することができる (Horel, 1984)。なお、本研究では、加藤・吉松 (1984) と同様に座標変換を用いた三次元解析を行うと同時に、 $c_n(t)$ の直交性を利用して、 $e_n(x, y)$ ではなく $c_n(t)$ 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た。

4.2 解析結果 (モード 1)

図一5 と図一6 はそれぞれ、PCA および CPCA を適用して得られたモード 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。図一6 で



図一五 PCAによるモード1 (寄与率 34.2%) 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)。

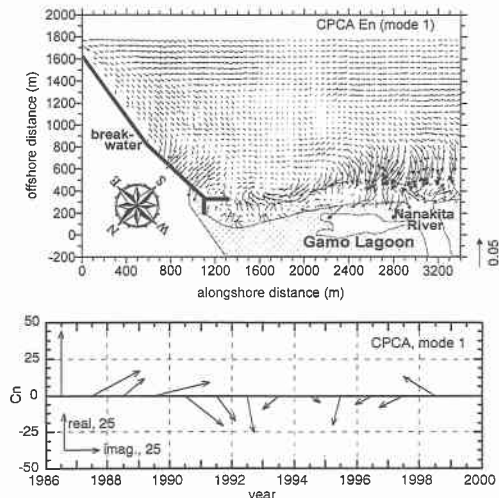
は鉛直上向きに各関数の実部を、水平右向きに虚部を表すようなベクトルとして表示している。

まず、水深値に対して解析を行っているの、図一五中の固有関数 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になるため堆積が、 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、 e_1 が正値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。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), 1982年に完成した翼堤の効果が現れ、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図一五および図一四から分かる。一方、七北田川河口前面およびその両岸領域では、 $e_1 < 0$ であるので、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に特有の定在波的地形変動パターンが抽出されたものと判断される。

また、図一六は、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図一五の e_1 分布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、図一六を一見し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。

4.3 地形の再合成

紙面の都合上示さないが、PCAのモード2にもモード



図一六 CPCAによるモード1 (寄与率 44.3%) の複素固有関数 e_1 の空間分布 (上) と複素時間関数 c_1 の時系列 (下)。ベクトルは上向き：実部、右向き：虚部を表している。

1と比較的類似した地形変化が表れており、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的に記述することのできるCPCAによる計算結果を用いて水深データを再合成し、CPCAのモード1～3による地形変化を算出した (図一七)。寄与率は、それぞれ44.3%、17.8%、12.6%であり、この主要3モードにより全変動の約75%を説明できる。ここでは、1988～1993年までの6年分の地形を連続的に表示しており、地形変化のパターンを見やすくするために、図一二に示される平均水深をそれぞれの再合成地形から引いて、変動成分のみを示している。ここに、白：平均水深よりも深い領域、グレー：平均水深よりも浅い領域を表している。

モード1による再合成地形を見ると、翼堤の影響によって北側領域では堆積傾向が進展しており (白→グレー)、それに伴って深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が示されている。各年の地形から前年の地形を差し引き、地盤高さの時間変化率を調べたところ、この沿岸方向への伝播は、堆積域が河口方向へ拡大している様子を捉えたものであることが分かった。さらに、河口前面ではテラス地形が形成されており、1989年頃までは成長し、その後は経年的に侵食されている様子が見て取れる。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

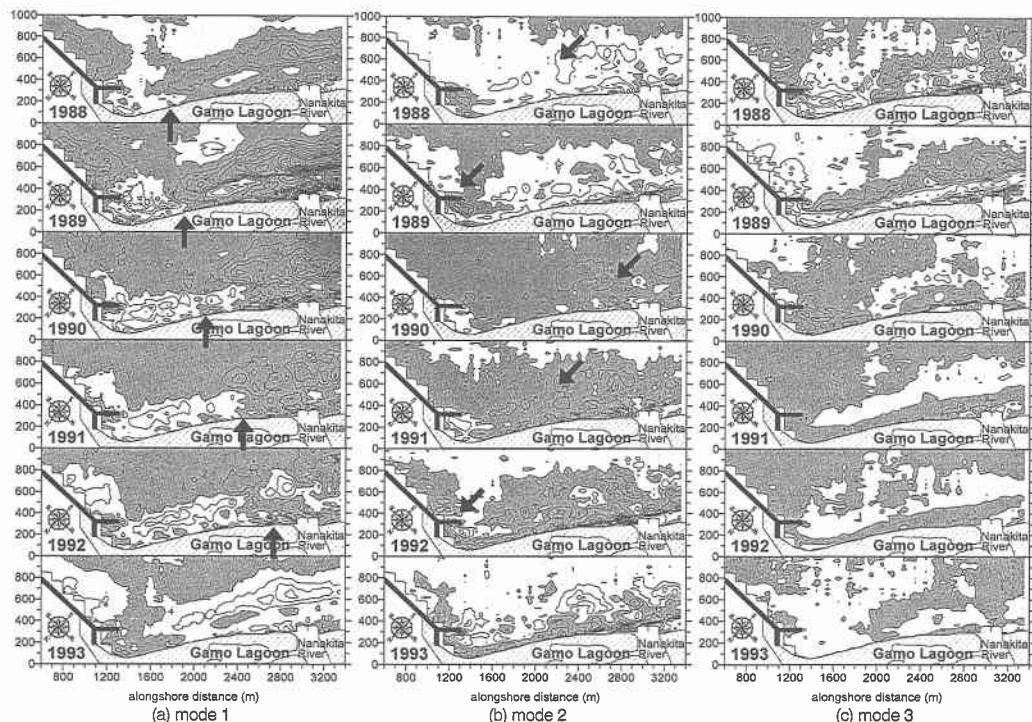


図-7 CPCA のモード 1～3 による再合成地形の時間変化, 1998 年から 1993 年まで (コンター間隔: 0.2 m).

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 からは、河口前面の沖合海域を中心に堆積域（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確認される。これは沖側から土砂が間欠的に供給され、それが沿岸方向（この場合、北向き）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と解釈される。また、モード 3 には水深 2～3 m 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推察される。

4.4 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、それを引き起こす外力との関係について検討する。地形変化の標準偏差（図-3）やトレンド（図-4）からも明らかなように、地形変動量は水深 10 m 程度よりも岸側で大きく、沖側では相対的に小さい。そこで、平均水深 10 m の等深線を境界として領域を 2 分割し、各領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とする。但し、上記のように分割すると、浅海域と深海域との面積差が大きく、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ため、ここでは、領域ごとの空間平均水深変化の形で評価する。

図-9 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 年の水深からの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 $F_{\text{on-off}}$ 、河川流量 Q_r を考え、それらと水深変化の対応関係を調べることにする。なお、波浪データについては、1 年毎に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、北向きおよび岸向きを正と定義した。 Q_r については 1 年間の単純平均値を用いた。

まず、モード 1 による平均水深変動を見ると、10 m 以浅では河口テラスの成長・衰退（図-7(a)）に対応して、1989 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-8 中に示す河川流量 Q_r の大小に概ね追従している。期間中の F_{along} の卓越方向は南向き（負）であるので、この長期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

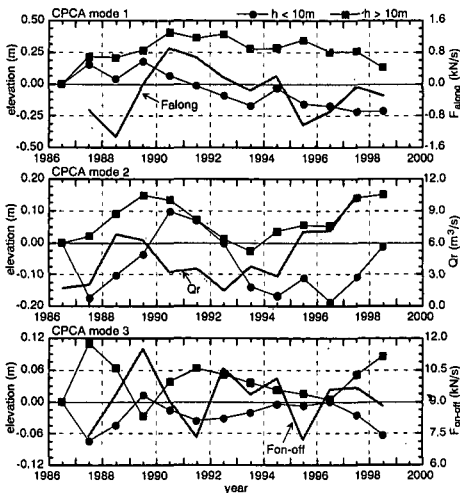


図-8 CPCA モード 1～3 による水深 10 m 以浅・以深に分割された領域の空間平均水深の変動 (1986 年基準) と波のエネルギーフラックスの沿岸成分 F_{along} (北向き: 正) と岸沖成分 $F_{\text{on-off}}$ (岸向き: 正), 河川流量 Q_r との比較。

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強い南西向きの流れや反射波を駆動するため、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、多少斜めに波が入射しても、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。すなわち、本海域ではテラスの地形効果とその侵食に伴う北向きの土砂移動と、防波堤近傍での南向き土砂移動とが混在しており、そのため、波向きの変化による F_{along} の経年的な方向変化が海浜の侵食・堆積に直接対応しなかったものと解釈される。

モード 2 による水深変動を見ると、1～2 年程度の位相差はあるものの、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、岸側より沖側の方が 1 年程度早く応答していることから、図-7(b) と併せて考えると、モード 2 による地形変動は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。また、モード 3 による水深変動を見ると、 $F_{\text{on-off}}$ が相対的に大きいときは岸側で堆積、沖側で侵食が進行し、反対に $F_{\text{on-off}}$ が小さくなると沖側で堆積、岸側で侵食が同時に生じており、モード 3 の変動成分が岸沖漂砂を表していることが確認される。また、この岸沖漂砂による土砂移動の周期は約 4～5 年程度であることが読み取れる。

5. おわりに

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、主成分解析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。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が分かった。

最後に、深浅データについては国土交通省東北地方整備局塩釜港湾空港工事事務所、波浪データについては港湾空港技術研究所海象情報研究室、河川流量データについては宮城県土木部港湾課からご提供いただいたものであることを付記し、深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 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, 港研報告, Vol. 23, No. 2, p. 27-47.
- 栗原 康 (1980): 干潟は生きている, 岩波書店, 219 p.
- 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 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.
- Horel, J. D. (1984): Complex principal component analysis: Theory and examples, *J. Climate Appl. Meteor.*, Vol. 23, pp. 1660-1673.
- Liang, G. and Seymour, R.J. (1991): Complex principal component analysis of wave-like sand motions. *Proc. Coastal Sediments '91*, ASCE, pp. 2175-2186.
- 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.