潮位の周期的変動に対する汀線位置の応答特性

The characteristic of shoreline response to cyclic tidal change

伴野雅之¹・栗山善昭²

Masayuki BANNO and Yoshiaki KURIYAMA

The responses of the shoreline change to cyclic tidal changes were investigated by the spectral analysis using FFT method and a multivariate autoregressive model. The shoreline data set were obtained for 25 years at Hazaki Oceanographical Research Station (HORS) facing the Pacific Ocean. The power spectrum densities showed shoreline changes with a period of 14.76 days, which is the spring-neap cycle of the tide. The relative power contribution analysis showed the tidal range affects the shoreline change rate as the main factor of 14.76 days cyclic variability, and it was indicated the mechanisms are due to the effects of the seawater percolation and the groundwater effluent by the difference between the water table and the tidal level.

1. はじめに

全球的な海面上昇に伴って世界各地において海岸侵食の加速が懸念されており、潮位変動を考慮した汀線変動予測モデルの開発の重要性が高まっている。そのようなモデルの開発には、短期的な時間スケールから長期的な時間スケールまでの潮位変動と汀線変動の応答関係の十分な把握が必要である。

これに対して、一潮汐における汀線の応答関係に関しては、Duncan (1964) が潮位の変動に対する地下水位の変動の遅れによって満潮時には波の遡上限界付近に堆積が生じ、干潮時には侵食が生じることを示した。しかしながら、一潮汐以上の潮位変動に対する汀線位置の応答に関しては、例えばBruun (1962) などによって長期的な潮位変化に対する汀線の応答が簡単には検討されているものの、汀線位置の長期的かつ高密度なデータを得ることが難しいことから、十分な検討はなされておらず、潮位変動に対する汀線位置の応答は必ずしも十分に把握されていないのが現状である。

そこで本研究では約25年間の汀線位置と潮位データから潮位変動に対する汀線位置の応答を周期帯毎に検討した。周期特性および応答特性の解析にはFFT (高速フーリエ変換) およびMARモデル (多変量自己回帰モデル) を用いた。また、沖波エネルギーフラックスに対しても潮位と同様に汀線位置の応答特性を検討した。

2. 時系列データの概要

図-1に本研究で用いた時系列データの一例 (1995年～1998年) を示す。汀線位置データは茨城県波崎海岸に位

置する波崎海洋研究施設 (以下、HORS) で得られたものである。HORSでは1986年より休日を除くほぼ毎日、長さ427mの観測栈橋にそって岸沖方向5m間隔で後浜から水深約6mまでの領域で断面測量が行われている。日々の汀線位置 (y) には観測した断面データにおける朔望平均満潮位 (H.W.L.) および平均潮位 (M.W.L.) 時における汀線位置 (冲向きを正) を用い、汀線変化速度 (dy/dt) は1日当たりの汀線前進量 (冲向き移動を正) として解析に供した。なお、本研究ではHORS周辺の汀線変動は岸沖漂砂により生じているものと仮定し、検討を行った。HORS周辺における前浜の砂の中央粒径 (d_{50})、空隙率はそれぞれ約0.18mm, 39.5%であり、L.W.L.,

図-1 H.W.L. およびM.W.L. の日汀線位置、日平均潮位、日潮位差および日平均沖波エネルギーフラックスの一例

- 1 正会員 修(工) (独法) 港湾空港技術研究所沿岸環境研究
領域沿岸土砂管理研究チーム 研究官
2 正会員 博(工) (独法) 港湾空港技術研究所 特別研究官

M.W.L., H.W.L.はそれぞれ -0.20m, 0.65m, 1.25m (D.L.=T.P.-0.687m基準)である。

潮位データについては, 1時間毎に鹿島港内で計測された実潮位の日平均値 (η_{ave}) および日潮位差 ($\Delta\eta$: 日最大値-日最小値)を用いた。沖波エネルギーフラックス (E_{f0})は鹿島港沖の全国港湾波浪観測網 (NOWPHAS)の観測点における実測の沖波有義波波高・有義波周期から求め, 日平均値として解析に供した。

なお, 時系列データの時間間隔は1日とし, 解析期間は1986年3月12日から2010年9月30日までとした。また, 欠測期間のデータに関しては加藤ら (1989)の方法による補間もしくは線形補間を行った。

3. 手法

(1) パワースペクトルおよびクロススペクトル

汀線変化速度, 平均潮位, 潮位差および沖波エネルギーフラックスの周期特性を検討するために, 各時系列データに対してFFTを行い, 周波数ごとのスペクトルを求めた。元データ数は8969個であり, ゼロパディングによりデータ数16384個とし, スペクトルには三角フィルタで5回の平滑化を行った。なお, 汀線位置と汀線変化速度は微分の関係にあるため, 位相が $\pi/2$ 異なるものの, 本質的には同じものであるため汀線位置のパワースペクトルは除外した。

また, 汀線変化速度-平均潮位, 潮位差, 沖波エネルギーフラックス間のクロススペクトルからコヒーレンスとフェイズを求め, 2信号間の周波数成分毎の相関関係および時間のずれを検討した。

(2) 相対パワー寄与率

汀線変動は複数の因子の変動と複雑に影響し合うフィードバック系を有しており, このようなシステムの解析においては, 式 (1) で表されるMARモデル (例えば, 北川, 2005) を用いることが多い。

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^k \sum_{m=1}^M a_{ij}(m)x_j(t-m) + e_i(t) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで, $x_i(t)$: 時系列データ ($i = 1, 2, \dots, k$), $a_{ij}(m)$: MAR係数, $e_i(t)$: 白色ノイズ (イノベーション), t : 時刻, m : タイムラグである。本研究において用いた時系列データは汀線変化速度, 汀線位置, 平均潮位, 潮位差, 沖波エネルギーフラックスの5変数 ($k = 5$) である。ここで, 例として2変数からなるフィードバック系を考えると, x_1 は x_2 の過去の値の線形和とノイズによって形成され, x_2 もまた x_1 の過去の値の線形和とノイズによって形成されており, システム外部からのノイズ (各変数固有の変動) がシステムの変動を形成していると考えられる。周波数 f において $x_i(t)$ のパワースペクトルに

図-2 汀線変化速度, 平均潮位, 潮位差および沖波エネルギーフラックスのパワースペクトル

占める $x_j(t)$ のイノベーションの割合 $r_{ij}(f)$ は相対パワー寄与率 (ノイズ寄与率) と呼ばれ, 式 (2) で定義される。相対パワー寄与率によって周波数領域における各変数間の寄与の実態を示すことができ, フィードバック構造の推定が可能となる。なお, $x_i(t)$ のパワースペクトルは式 (3) で表される。

$$r_{ij}(f) = \frac{|A(f)^{-1}_{ij}|^2 \sigma_j^2}{p_{ii}(f)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$p_{ii}(f) = \sum_{j=1}^k |A(f)^{-1}_{ij}|^2 \sigma_j^2 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで p_{ii} : x_i のパワースペクトル, $A(f)$: $a_{ij}(f)$ を成分とするMAR係数の行列, σ_j^2 : ノイズ項の分散であり, $a_{ij}(f)$ は式 (4) のフーリエ変換で求められる。

$$a_{ij}(f) = \sum_{m=0}^M a_{ij}(m) e^{-2\pi i f m} \quad \dots\dots\dots (4)$$

回帰係数 $a_{ij}(m)$ の決定にはLevinson-DurbinのアルゴリズムによりYule-Walker方程式を解き, AIC (Akaike Information Criterion) による最適次数 M の選択を行った。

4. 結果

(1) パワースペクトル

図-2に各時系列データのパワースペクトルを示す。H.W.L.の汀線変化速度は14.76日周期（半朔望周期）、182日周期、365日周期において比較的大きなピークを示し、これら三つの周期における周期性が強いということが示された。一方、M.W.L.の汀線変化速度は182日周期、365日周期においてピークを示したものの、14.76日周期においてはピークが認められなかった。

平均潮位に関しては、14.76日周期と365日周期において比較的大きなピークが認められた。潮位差に関しては、14.76日周期、182日周期の他に、複数のピークが見られた。沖波エネルギーフラックスに関しては、182日周期、365日周期において比較的大きなピークが認められた。

(2) クロススペクトル

汀線変化速度（H.W.L.）のスペクトルは14.76日周期、182日周期、365日周期においてピークを示したことから、これら三つの周期帯における検討を行った。表-1に時系列データ間のクロススペクトルにおけるコヒーレンスとフェイズを示した。H.W.L.の汀線変化速度に対して、14.76日周期においては平均潮位、潮位差が高いコヒーレンスを示し、182日周期においては潮位差、沖波エネルギーフラックス、365日周期においては平均潮位、沖波エネルギーフラックスが高いコヒーレンスを示した。一方、M.W.L.の汀線変化速度に対して、182日周期、365日周期においてはH.W.L.の汀線変化速度と同様の傾向を示したが、14.76日周期におけるコヒーレンスはいずれの変数に対しても小さかった。

図-3に各周期成分において汀線変化速度（H.W.L.）が負の最大時（後退速度が最大時）となったときの各変数の位相を表-1のフェイズをもとに示す。なお、図-3には汀線変化速度（H.W.L.）に対するコヒーレンスが0.80以上であった変数のみを示している。汀線後退速度が最大となるのは、14.76日周期においては潮位差が最大となる約1.8日前、平均潮位が最小となった約2.4日後である。182日周期においては、潮位差が最小、沖波エネルギーフラックスが最大となる約2週間前である。1年周期においては沖波エネルギーフラックスが最大となる約2ヶ月半前、平均潮位が最大となった約1ヶ月後である。

(3) 相対パワー寄与率

M.W.L.とH.W.L.の汀線変化速度は14.76日周期における周期特性を除いては周期特性がほぼ同じであることから、以下ではH.W.L.の汀線変動に関して主に取り扱い、特に表記がない場合には、H.W.L.の汀線変動を意味する。相対パワー寄与率においてもH.W.L.の汀線変動のみ取り扱った。

表-1 汀線変化速度とのクロススペクトルにおけるコヒーレンスおよびフェイズ
(コヒーレンスが0.80以上：青枠, 0.90以上：赤枠)

shoreline change rate (H.W.L.)	T [day]	coh ²	θ_{xy}	Time lag [day]
vs tidal level	14.76	0.87	-0.33π	-2.4
	182	0.63	0.78π	71
	365	0.91	0.80π	146
vs tidal range	14.76	0.95	-0.76π	-5.6
	182	0.85	0.20π	19
	365	0.08	-0.71π	-130
vs wave energy flux	14.76	0.61	-0.54π	-4.0
	182	0.94	-0.84π	-76
	365	0.94	-0.55π	-101

shoreline change rate (M.W.L.)	T [day]	coh ²	θ_{xy}	Time lag [day]
vs tidal level	14.76	0.47	0.96π	7.1
	182	0.62	0.73π	67
	365	0.87	0.72π	132
vs tidal range	14.76	0.03	0.53π	3.9
	182	0.84	0.14π	26
	365	0.08	-0.76π	-276
vs wave energy flux	14.76	0.47	0.58π	4.2
	182	0.92	-0.90π	-82
	365	0.92	-0.62π	-113

図-3 複素平面上におけるスペクトルの位相関係
(振幅は標準化)

AICによる次数選択の結果、MARモデルの次数は $M=60$ となった。MARモデルから求めた汀線変化速度のパワースペクトルを図-4に示す。この次数においては14.76日周期においては大きなスペクトルのピークが検出

されたものの、182日周期および365日周期におけるスペクトルのピークは明確でなかった。

また、図-4にMARモデルから得られた全周波数における汀線変化速度に対する相対パワー寄与率を示す。また、上記の三つの周期帯における全ての変数の相対パワー寄与率を図-5に示す。汀線変化速度のパワースペクトルに対して、ほとんどの周波数領域において汀線変化速度自身のイノベーションによる寄与が占めているけれども、14.76日周期においては潮位差のイノベーションによる寄与が最も大きく ($\gamma = 0.72$)、次いで汀線変化速度自身のイノベーション、汀線位置のイノベーションによる寄与が大きかった。一方で、182日周期、365日周期のような比較的長周期領域においては、汀線変化速度自身のイノベーションによる寄与がほとんどであるけれども、沖波エネルギーフラックスのイノベーションによる寄与が比較的大きくなっていった。

潮位差に関しては、いずれの周期においても自己のイノベーションによる寄与が大きく、他の変数による影響は小さいと考えられた。平均潮位に関して、14.76日周期においては潮位差のイノベーションの寄与が大きく、182日、365日周期においては沖波エネルギーフラックスと自己のイノベーションの寄与が大きかった。沖波エネルギーフラックスに関して、14.76日周期においては潮位差と自己のイノベーションによる寄与が大きく、182日、365日周期においては自己のイノベーションの寄与が大きかった。汀線位置に関しては汀線変化速度とほぼ同じパワー寄与率の分布であった。

5. 考察

(1) 14.76日周期における汀線応答特性

14.76日周期において汀線変化速度と高いコヒーレンスを示した変数は潮位差および平均潮位であった。相対パワー寄与率の結果においては汀線変化速度への寄与は潮

位差が大きく、平均潮位の影響は小さかった。また、潮位差に関しては自己のイノベーションによる寄与がほとんどであり、平均潮位に関してもほとんどが潮位差による寄与で変動していることが示された。これらを総合的に判断すると図-6の影響関係（フィードバック構造）が推定される。すなわち、汀線変化速度に影響を与えているのは潮位差および汀線位置であって、平均潮位は潮位差の影響を受けて変動しているに過ぎず、汀線変動へ与える影響は小さいということが分かる。同時に、14.76日周期における沖波エネルギーフラックスの影響は相対的に非常に小さく、本周期における汀線変動は潮位差による影響が圧倒的であると推定される。

Thompson (1919) や LaFond (1939) は平均潮位よりもやや高い場所においては大潮の数日後に最も地盤高が低くなることを示しており、本研究においても大潮の約2日前に汀線の後退速度が最大となり、大潮の約2日後には汀線位置が最も後退位置となるという同様の結果を示している (図-3)。14.76日周期の汀線変動のメカニズムはDuncan (1964) が示した潮位に対する地下水位の相対位置に応じた海水浸透と地下水流出の影響によるものと考えられる。すなわち、以下の現象が推察される。前浜付近の地下水位は潮位に伴って変動するけれども、小潮時においては地下水位がH.W.L.を超えることはまれであり、なおかつH.W.L.の地盤高位置は干出もしくは波の遡上域に当たる時間が長いので、海水の浸透による堆積過程の影響を受け、汀線が前進しやすい。一方で、小潮時と比較して大潮時の方が地下水位の大幅な上昇を招きやすく、結果として大潮時付近において高地下水位による侵食過程の影響により汀線が後退しやすい。すなわち、14.76日周期の汀線変動は潮位差が汀線変動に影響しているというよりは潮位の最大値が上昇・下降する事が影響していると考えられ、伴野・栗山 (2011) による解析で潮位の日最大値が汀線変動へ与える影響が大きいという

図-4 MARモデルから得られたパワースペクトル（上段）および汀線変化速度に対する相対パワー寄与率（下段）

図-5 三周期帯における時系列間の相対パワー寄与率

図-6 14.76日周期におけるフィードバック構造

結果とも一致する。

また、M.W.L.の汀線変動が14.76日の周期性を有していなかった理由は以下のように考えられる。wave setupや波の遡上を考慮して大潮から次の大潮までを考えると、地下水位がM.W.L.を超える頻度は高いことに加え、M.W.L.の地盤高位置は浸水域に当たる時間が長い。このことから、M.W.L.の地盤高位置は潮位による影響を余り受けなかったと推定され、14.76日周期における潮位差の影響は小さくなったものと考えられる。

(2) その他の周期における汀線応答特性

本研究で用いたMARモデルから求めたパワースペクトルでは182日周期および365日周期における明確なピークがなく(図-4)、これらの周期における相対パワー寄与率は十分に周期特性を表しているとは限らないけれども、大きく寄与の傾向は変わらないと考えられる。

汀線変化速度の相対パワー寄与率において、100日周期以下の短周期帯においては沖波エネルギーフラックスの影響が比較的大きいことが示されている。一方、182日周期付近では沖波エネルギーフラックスの影響が比較的大きくなり、より長周期の1000日周期付近では潮位の影響が比較的大きくなる傾向が見られた。このことは汀線の1年以上の長周期変動は沖波エネルギーフラックスよりも平均潮位による寄与が大きくなることが示唆しており、長期的な海面上昇によって汀線も長期的に後退していくことが予測される。しかしながら、長周期の汀線変動に関しては本研究からは十分な結論を得ることはできず、更なる検討が必要である。

6. おわりに

1986年から2010年までの汀線変動に対してFFTおよびMARモデルを用いて潮位変動に対する汀線位置の応答特性を検討したところ、H.W.L.の汀線変動は潮位差の影響により、14.76日の高い周期性を有していることが明らかとなった。これは潮位に対する地下水位の相対位置に応じた海水浸透と地下水流出の影響によるものと推察された。一方、M.W.L.の地盤高付近においては海水浸透による堆積過程の影響が小さいため、14.76日の周期性が弱かったと推察された。また、1年以上の長期の汀線変動に対しては平均潮位の影響が大きくなることが示唆され、長期的な海面上昇による海岸侵食の増加が予測された。

謝辞：本研究で使用した地形断面データは独立行政法人港湾空港技術研究所沿岸土砂管理研究チーム(旧漂砂研究室)によって観測されたものである。また、波浪データ及び潮位データは国土交通省港湾局により提供されたものである。ここに記し感謝の意を表する。

参考文献

- 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—, 港研報告, 28巻, pp.3-41.
- 北川源四郎(2005)：時系列解析入門, 岩波書店, 265p.
- 伴野雅之・栗山善昭(2011)：重回帰モデルによる長期汀線変動に対するバー及び潮位変動の影響評価, 土木学会論文集B2 (海岸工学), 67, pp.501-505.
- Bruun, P. (1962) : Sea level rise as a cause of shoreline erosion, Journal of the Waterways and Harbors Division, Proc. ASCE, Vol.88, WW1, pp.117-130.
- Duncan, U.S. (1964) : The effect of water table and tide cycle on swash-backwash sediment distribution and beach profile development, Marine Geology, Vol.2, pp.186-197.
- LaFond, E.C. (1939) : Sand movement near the beach in relation to tides and waves, Proc. 6th Pacific Sci. Congr., pp.795-799.
- Thompson, W.F. (1919) : The spawning of the Grunion (Leuresthes tenuis), California State Fish and Game Commission, Fish Bulletin, No.3.