潮位による影響及び時間的異質性を考慮した 汀線変動モデルの構築と将来予測

Development of Shoreline Change Model Considering Time Heterogeneity and Tidal Impact and Prediction of Future Shoreline Position under Global Climate Change

伴野雅之¹・栗山善昭²

Masayuki BANNO and Yoshiaki KURIYAMA

This study developed the shoreline change model using a random effect of time heterogeneity which was caused by the influence of unmeasured variables, and the model could estimate the effects of the wave energy and the tidal level. The developed model predicted the future shoreline positions from 2008 to 2095 with assumptions of sea level rises and wave climate changes under the global climate changes on the Hasaki coast in Japan, facing the Pacific Ocean. The simulation results showed that the foreshore would be eroded approximately 20 m and the shoreline position would retreat approximately 40 m due to global climate change by the end of this century.

1. はじめに

将来予測されている地球温暖化に伴う海面上昇や台風等の巨大化は海岸侵食の深刻化を招き、海浜の有する防災や環境上の機能の低下を引き起こすことから、海浜の長期安定性を考慮した対策が必要とされている。実際に、ここ数十年間の海面上昇はIPCCの予測結果よりも大きい傾向にあることが示されており (Rahmstorf et al., 2012), 海岸侵食のより一層の深刻化が懸念される。また、森ら (2009) は今世紀末の日本近海における波高の平均値は減少する一方で、最大波高は増加し、気候が極端化すると予測しており、これに対応して海浜地形は現在と比較してよりドラスティックに変動すると考えられる。

このような将来の外力変化に対する海浜地形の長期的変化を予測することは将来の海岸侵食対策を考える上で非常に重要であり、その予測には波浪エネルギーの変化のみならず海面上昇による地形変化への影響を評価できるモデルの開発が必要である。例えばBruun (1962) は海面変化に応じて平衡断面が遷移することで海浜変形が生じる、いわゆるBruun則を示し、長期の海面変化に対する地形変化を求めることを可能にした。しかしながら、Bruun則による地形変化は平均波浪に対する平衡状態を仮定したものであり、海面上昇と同時に時々刻々変化する波浪における非平衡状態での地形変化を評価することはできない。

一方で、地形変化は様々な影響因子が複雑に影響しあう現象であるけれども、現実にはそのすべての因子を観

測し、モデルへ反映させることは難しい。時系列データにおいて、そのようなモデルに反映できない未知変数は時間的に異なり、しばしば目的としている観測値のばらつきを増大させる。このような未知変数に起因した観測値にばらつきを生じさせる影響のことを統計学的にランダム効果 (Random effects) と呼び、このランダム効果を考慮した統計モデルを一般化線形混合モデル (GLMM) と呼ぶ (例えば、久保, 2012)。時系列データにおける上述のようなランダム効果は「時間的異質性」と呼ぶことができ、時間的異質性を有する現象をモデリングする際には、ランダム効果を考慮しなければモデルパラメータを正確に推定できないという問題が生じる。

そこで本研究では、波浪エネルギーを主な汀線変動の外力としたモデルを発展させ、潮位による影響と時間的異質性を考慮した長期的な予測が可能な汀線変動モデルを構築した。具体的には、波浪エネルギーに対する汀線の応答特性に潮位や未知変数が与える影響を考慮したモデルであり、統計的手法を応用し、未知変数による影響をランダム効果とした線形混合モデルである。また構築されたモデルを用い、地球温暖化に伴う海面上昇や波浪条件の変化による汀線位置の将来予測を行った。

なお、本研究における汀線変動モデルは岸沖方向に一次元のモデルであり、汀線位置とは現在のH.W.L.の地盤高の岸沖位置である。つまり、海面上昇によって汀線位置の基準となる地盤高は変化させないことから、本研究における汀線位置の定義はいわゆる水際ではなく、汀線変動は前浜の侵食や堆積の状況を表す指標として取り扱うことができる (図-1)。

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

図-1 本研究における汀線位置の定義

2. モデルの構築

(1) 現地観測データ

本研究で取り扱うデータは伴野・栗山（2011）で用いられたデータと同様の方法で取得されたものであり、茨城県波崎海岸に位置する波崎海洋研究施設ならびにその近傍で得られたH.W.L.の汀線位置、沖波エネルギーフラックス、潮位の日データ（以下、HORSデータ）である。本研究で用いる汀線変動量は1日当りの汀線の移動量とし、沖向きの前進を正、岸向きの後退を負とした。なお、本研究では1986年3月12日から2007年12月31日までの22年間をデータの対象期間とした。

(2) 分布型の近似

汀線変動は主に波浪エネルギーによって生じる現象であることから、構築する汀線変動モデルも波浪エネルギーを基礎としたものである必要がある。一方で、永井ら（1998）が波浪エネルギーの発生確率分布に対して適用したように、有義波波高の二乗と有義波周期の積で求められる沖波エネルギーフラックスの発生確率分布は中心極限定理より対数正規分布に近似できるが、汀線変動量の発生確率分布は正規分布の負値側の裾野が長くなった分布型となっている（図-2 (a)、図-2 (b)）。目的変数と説明変数の分布型が全く異なる場合、線形でモデリングすると大きな誤差が生じ、精度の低いモデルになってしまうことから、変数変換により目的変数と説明変数の分布型を近似させる必要がある。

そこで本研究では沖波エネルギーフラックスに対して対数変換を行うことで正規分布に近似し、さらに対数値を二乗することで汀線変動量の発生確率分布に分布型を近似した変数（図-2 (c)）を汀線変動モデルに用いることとし、目的変数である汀線変動量が沖波エネルギーの対数の二乗値と定数（切片）によって表される式(1)を汀線変動モデルの基礎式とした。

$$\frac{dy}{dt} = \alpha_1 (\log Ef)^2 + \alpha_2 + \varepsilon \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 dy/dt ：汀線変動量、 Ef ：沖波エネルギーフラックス、 α_1 、 α_2 ：係数、 ε ：誤差である。なお、モデル内の変数に $(\log Ef)^2$ を用いたことで、本モデルは沖波エネ

図-2 各変数の確率分布 (a) 汀線変動量, (b) 沖波エネルギーフラックス, (c) 沖波エネルギーフラックスの対数の二乗値

ルギーフラックスの増加に対して、汀線後退量は増加するが、その増加量は徐々に小さくなる傾向を表す。

(3) 汀線応答に影響を与える変数の導入

沖波エネルギーフラックスに対する汀線の応答は一意的なものではなく、例えばその時の潮位や汀線位置に応じて変化する。つまり、作用する波浪エネルギーが同じであっても、潮位が高い場合や汀線位置が既に前進した位置にある場合には、より侵食が生じやすくなることが推測される。このような潮位や汀線位置といった変数は直接的に汀線変動を引き起こす外力ではないけれども、波浪エネルギーに対する汀線の応答に影響をあたえることから、式(1)における係数 (α_1, α_2) を変動させるものであると考えることができる。本研究では、汀線の応答に影響を与える変数として潮位及び汀線位置を考慮し、その影響が線形結合で表すことができると仮定し、式(1)を式(2)へと発展させた。

$$\frac{dy}{dt} = (\beta_1 + \beta_3 y + \beta_5 \eta_{ave}) (\log Ef)^2 + (\beta_2 + \beta_4 y + \beta_6 \eta_{ave}) + \varepsilon \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 y ：汀線位置、 η_{ave} ：平均潮位、 $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6$ ：係数である。

(4) 時間的異質性の考慮

本研究における時間的異質性とは、潮位や汀線位置が

波浪エネルギーに対する汀線の応答に影響を与えたように、未知変数による影響で年によって汀線の応答が異なることを表したものである。最終的に本研究で構築した汀線変動モデルは式(2)の線形結合に時間的異質性であるランダム効果を加えた式(3)の一般化線形混合モデルへと拡張したものである。

$$\frac{dy}{dt} = (\beta_1 + \beta_3 y + \beta_5 \eta_{ave} + r_1)(\log Ef)^2 + (\beta_2 + \beta_4 y + \beta_6 \eta_{ave} + r_2) + \varepsilon \quad (3)$$

ここで r_1, r_2 ：年による時間的異質性（ランダム効果）を表すパラメーターであり、年ごとに正規分布（平均0、分散 σ^2 ）に従って値が変化するものである。ランダム効果は一定値として推定されるものではなく、効果のばらつきである分散 σ^2 のみによって表される確率分布である。なお、一般に時系列データにおけるランダム効果はその時間区切りを短くすればするほど分散が大きくなり、モデルの実測値への当てはまりは解析的には良くなる。しかしながら、分散が増大することで将来の予測値に対する不確実性も増大することになるため、実用上は単純に時間区切りを短くすることには意味が無い。そのため、目的や実状に合わせた複数の時間区切りのランダム効果を同時にモデル内に考慮し、モデルを評価する必要があるが、本研究では、過度なパラメータの推定の複雑化を避ける必要があること、長期的な汀線変動の将来予測を対象とすることから、年による時間区切りのランダム効果（年の時間的異質性）のみを考慮することとした。

(5) モデルパラメータの推定とモデルの精度

本モデルの係数決定にはHORSデータを用い、 ε が正規分布に従うとし、最尤推定法を用いた。なお、誤差の増大を防ぐため、1986年から2007年のデータの内、汀線位置の測量間隔が36時間以内のデータのみを係数決定に用いた（ $n=4361$ ）。ランダム効果 r は年を一つのグループとし、その分散 σ^2 のみを最尤推定した。なお、 r_1 と r_2 は二変量正規分布として与えた。推定された各パラメータの影響度を評価するために、上述の係数決定用データを乗じることで、各パラメータを汀線変動量の次元で示し、そのばらつきを比較した（図-3）。ばらつきの大きさは汀線変動への影響度を表すものであり、ランダム効果のばらつきは、その他のパラメータのばらつきに対して比較的大きいことから、本モデルにおいてはランダム効果の影響が比較的大きいことが示された。

本モデルの汀線位置の推定精度を検証するために、推定されたモデルを用い、1986年から2007年の日々の汀線位置を追算した（図-4）。追算値と実測値の決定係数は0.68であり、この値は伴野・栗山（2011）の重回帰モデルによる追算結果よりも大きく、十分な推定精度を有し

図-3 モデル構成要素の値のばらつき

図-4 構築されたモデルを用いた汀線位置の追算結果

ていることが示された。また、本モデルはランダム効果によって将来の不確実性を考慮できることから、将来において1986年から2007年に起こった現象では説明できない何らかの極端な現象が生じない限り、本モデルは十分な精度と安定性を有した将来予測計算が可能であると考えられる。

3. 将来予測

得られた汀線変動モデルを用い、海面上昇と波高の変化シナリオに応じた2008年から2095年までの波崎海岸における汀線位置の変動を将来予測した。予測計算においてはランダム効果を最尤推定された分散を有した正規乱数として与えたモンテカルロ・シミュレーションを10,000回繰り返した。

シナリオはA：海面上昇が現在までの実測速度（4.8 mm/year）で生じる場合、B：海面上昇速度がIPCC AR4

表-1 将来予測に用いたシナリオ

Scenario	Sea Level Rise Rate	Wave Climate Change
I	A (4.8mm/year)	—
II	A (4.8mm/year)	C (Mori et al. (2009))
III	B (4.8mm/year+ α)	—
IV	B (4.8mm/year+ α)	C (Mori et al. (2009))

の最大予測量に従い、現在のものよりも徐々に早くなる場合、C：森ら（2009）の将来の波高予測に基づき将来の波高が変化する場合（平均値の減少，最大波高の増加）を組み合わせたものとした（表-1）。具体的には、シナリオデータは1986年から2007年までの22年間の実測の波高及び潮位を将来の22年毎に繰り返したものを基本とし、シナリオAに関しては海面上昇のトレンドを考慮し、潮位に対し海面上昇分を補正した。シナリオBに関しては、海面上昇トレンドとして、1995年から2005年の海面上昇量がIPCC AR4（2007）の全球平均海面上昇量の全シナリオの最大予測値である59cmとなるように、2008年以降の海面上昇速度をシナリオAの海面上昇速度の4.8mm/yearから線形的に加速させた潮位を用いた。シナリオCに関しては、波浪の周期は変化させずに波高の変化のみを考慮し、対応する沖波エネルギーフラックスを計算した。2008年から2029年の波高は変化させずに現状と同じ波高とし、それ以降は22年毎に波高の平均値を1%、2%、3%減少、極値波高を5%、10%、15%増加させた沖波エネルギーフラックスを用いた。つまり、現在の沖波エネルギーフラックスの発生確率分布の平均値 μ をそれぞれ 0.99μ 、 0.98μ 、 0.97μ とし、超過確率1%の値が現在の 1.05^2 倍、 1.10^2 倍、 1.15^2 倍となるように分散を調整した将来の沖波エネルギーフラックスの発生確率分布を用い、将来の値を求めた。

図-5にシナリオを用いた将来予測結果、表-2に各シナリオの2074年から2095年の最頻値と超過確率5%値、非超過確率5%値を示す。現状の海面上昇トレンドが継続するとしたシナリオIでは今世紀末の汀線位置の最頻値は-16mであり、シナリオIIIでの海面上昇速度が加速した場合には-19mまで後退する。1986年から2007年の平均汀線位置は2.4mであったことから、将来の海面上昇によって岸沖方向に約20m程度の海岸侵食が前浜に生じると推測された。

一方で、海面上昇と同時にシナリオII、IVにおける波高の変化を考慮した場合、波高の変化を考慮していない場合（シナリオI、II）と比較して、最頻値はほとんど変化がなく、非超過確率5%値はわずかに後退すること

図-5 各シナリオにおける汀線位置の年間期待日数分布の将来変化

が示された。一方、超過確率5%値は5m程度前進することが示された。すなわち、将来の波浪条件の変化によっては汀線が大きく後退することはない、むしろ汀線の前進する確率が上昇すると考えられる。このような結果が得られた理由は、最大波高の増加による影響は頻度が少ないことや波高の増加に対する汀線の応答が非線形であることから限定的となる一方で、波高平均値の減少によって汀線が前進しやすくなるためであると考えられる。

4. 本モデルと Bruun 則との比較

ここで、将来の海面上昇に伴う、本モデルと Bruun 則による汀線の後退量の比較を行う。Bruun 則は、将来の海面上昇による汀線後退量を検討する上で比較的多く用いられてきたものである（例えば、吉田ら、2012）。こ

表-2 各シナリオにおける2074年～2095年の汀線位置
(5%非超過確率値, 最頻値, 5%超過確率値)

Scenario	Non-exceedance Probability (5%) Position	Mode Position	Exceedance Probability (5%) Position
I	-38m	-16m	9m
II	-39m	-16m	14m
III	-42m	-19m	5m
IV	-43m	-19m	10m

ここで, Bruun則における汀線とはいわゆる水際であり, 海面の上昇とともに汀線位置の基準となる地盤高が変化する点に注意が必要である。

Bruun則を用いた汀線後退量の計算にはバーム高さ Bh , 土砂の移動限界水深 h_c , バーム頂部から移動限界水深までの水平距離 L を用いた平均海底勾配が必要となり, 本研究においては $Bh=2.5\text{m}$, $h_c=8\text{m}$ (宇多, 1997), $L=900\text{m}$ とし, 波崎海岸における平均海底勾配は $1/86$ であると仮定した。この仮定のもとBruun則を用い, シナリオⅢと同じ 59cm の海面上昇による汀線後退量を計算すると, 51m と算出された。

一方で本モデルのシナリオⅢの結果 (2074年から2095年の最頻値) を用いると, 汀線後退量は 21.4m である。しかしながら, 本モデルの汀線位置の定義は前述したように現在のH.W.L.の地盤高の岸沖位置であり, 海面上昇による水際の後退量を含んでいないため, 単純にBruun則の結果と比較できない。そこで海面上昇により前浜勾配が変化しないと仮定し, 前浜勾配を実測値に基づき $1/35$ として, 海面上昇による水際の後退量を考慮すると, 本モデルによる地形変化と水際の後退を足しあわせた汀線変化量は 42m と算出された。本モデルによる後退量はBruun則よりも20%程度小さいけれども, シナリオⅢの結果は2074-2095年の最頻値であり, 海面上昇量が 59cm に達していない期間のデータを含むことから, 実際にはおよそ同程度の汀線後退量となると考えられる。すなわち, 本モデルはBruun (1962) が示したメカニズムを考慮できている上, 平衡状態における汀線位置のみならず, 時々刻々と変化する波浪における非平衡状態での地形変化を考慮できるモデルであることから, 将来における極値波浪による汀線の後退量等の検討も可能であり, 非常に汎用性が高いモデルであると考えられる。

5. おわりに

本研究では, 波浪エネルギーに対する汀線の応答特性に及ぼす「潮位の影響」及び未知変数に起因した影響である「時間的異質性」を考慮した精度の高い汀線変動予測モデルを構築した。本モデルは将来の海面上昇による

影響を考慮できる上, 時間的異質性を将来の不確実性として考慮して計算することができる。本モデルを用いて将来の海面上昇および波高の変化シナリオによる波崎海岸における汀線位置の将来予測計算を行った結果, 将来の海面上昇及び波浪の変化により汀線は後退し, 岸沖方向に約 20m 近い前浜の侵食が生じると考えられる。また, 将来の海面上昇が汀線の大幅な後退を引き起こす要因である一方で, 将来の波高の増大による汀線の後退量は小さく, 波高平均値の減少により汀線は前進しやすくなると考えられる。さらに, 海面上昇 (IPCC AR4の予測) に伴う地形変化に加え, 水際の後退を考慮した今世紀末の汀線の後退量を算出した結果, 後退量の最頻値は 42m となり, Bruun則により算出した汀線の後退量とおおよそ同程度であることが示された。

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。本研究を進めるにあたって, 九州大学大学院 橋本典明教授から様々なアドバイスを頂いた。また, 国土交通省港湾局 細川真也氏, 中電技術コンサルタント株式会社 田多一史氏, (独) 港湾空港技術研究所 渡辺謙太氏とは有益な議論を行った。ここに記し感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 宇多高明 (1997) 日本の海岸侵食, 山海堂, 442p.
- 久保拓弥 (2012) : データ解析のための統計モデリング入門 一般化線形モデル・階層ベイズモデル・MCMC, 岩波書店, 272p.
- 永井紀彦・渡邊 弘・川口浩二 (1998) : 長期波浪観測結果に基づく我国沿岸の波パワー出現特性の検討, 港研資料, No.895, pp.1-26.
- 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), Vol.67, No.2, pp.501-505.
- 森 信人・岩嶋亮太・安田誠宏・間瀬 肇・Tracey H. Tom (2009) : 地球温暖化予測に基づく全球の海上風・波浪の将来変化予測, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.65, No.1, pp.1271-1275.
- 吉田 惇・有働恵子・真野 明 (2012) : 日本の5海岸における過去の長期汀線変化特性と気候変動による将来の汀線変化予測, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, pp.1246-1250.
- 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.
- IPCC AR4(2007) : IPCC fourth assessment report, <http://www.ipcc.ch/>, 2013/5/1
- Rahmstorf, S., G. Foster and A. Cazenave (2012) : Comparing climate projections to observations up to 2011, Environ. Res. Lett., Vol.7, 044035, pp.1-5.