長期地形観測データに対する 非線形混合モデルの適用による平衡断面の不確実性評価

Uncertainty Estimation of Equilibrium Beach Profile
by Nonlinear Mixed-Effect Model with Long-term Measured Data

伴野雅之¹・栗山善昭²・橋本典明³

Masayuki BANNO, Yoshiaki KURIYAMA and Noriaki HASHIMOTO

This study developed a semi-empirical equilibrium-based shoreline change model, which was a nonlinear mixed-effect model allowing for random effects at equilibrium foreshore profiles. Using the model, the long-term uncertainties of equilibrium foreshore profiles, which were derived from such incompleteness of the model equation and latent variables unconsidered in the model were investigated. The model was applied to the longitudinal sandy beach profile data obtained at the Hasaki coast of Japan. The result showed that the uncertainties had the equilibrium foreshore profiles move parallel to the cross-shore direction, which resulted in foreshore deposition and erosion over several years and the slope of the equilibrium foreshore profile grew steeply with time by the uncertainties.

1. はじめに

将来の気候変動に伴う海浜変形への適応策を論じる上で、特に防災や環境上の影響が大きい前浜の地形変化を予測することの重要性は高いと考えられる。一方で、一般に数ヶ月から数年程度の海浜変形は沿岸漂砂によって生じることが多いけれども、海面上昇や波候変化のような数年から数十年スケールの現象が生じる場合には、海浜の平衡断面に変化が生じ、長期の海浜変形は岸沖漂砂の影響も強く受けると考えられる。そのような背景のもと、岸沖漂砂による前浜の地形変化を予測するモデルの構築が進められており、過去の汀線変動については比較的精度の高い追算が可能となってきた（例えば、Miller・Dean, 2004; Yates et al., 2009; Davidson et al., 2010; Davidson et al., 2013; 伴野・栗山, 2013）。これらのモデルを用いて将来の前浜地形変化を予測する際には、その不確実性を十分に考慮する必要があるが、そのような検討を行っている事例は非常に少ない。

一方で、岸沖漂砂による前浜の地形変化モデル（汀線変動モデル）の多くは外力条件に対応した平衡断面を仮定し、現在の地形が平衡断面へと漸近していく、いわゆる平衡型の地形変化モデルであるが、平衡断面の不確実性に関する検討は上述同様に、これまで十分に行われていなかった。特に、その不確実性による平衡断面の長期的な傾向は長期的に汀線を前進もしくは後退させること

から、十分な注意が必要である。

そこで本研究では、非線形混合モデルに発展させた平衡型汀線変動モデルを構築し、そのモデルに対し、茨城県波崎海岸で長期観測された前浜地形断面のある特定の高さにおける岸沖移動量を汀線変動量として複数の基準高さと与えることで、前浜地形断面の変化を再現し、前浜の平衡断面の不確実性を評価した。本研究においては、特にその不確実性による平衡断面の長期的な変化を評価の対象とした。

2. 平衡型汀線変動モデル

本研究で用いた平衡型汀線変動モデルは伴野・栗山（2013）を基に、波浪エネルギーの取り扱いに修正を加えた式（1）及び式（2）を用いた。

$$\begin{aligned}\frac{dy}{dt} &= A_{force}(y_{eq} - y) + \varepsilon \\ &= A_{force}\{y_{eq, fixed} + (r | time) - y\} + \varepsilon\end{aligned}\quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\begin{aligned}y_{eq, fixed} &= \Delta y_{eq} + y_0 \\ &= \frac{(\beta_3 E_f^{0.5} + \beta_4)(\eta_{ave} - \overline{\eta_{ave}})}{\beta_1 E_f^{0.5} + \beta_2} + y_0 \quad \dots\dots\dots (2) \\ &= \frac{(\beta_3 E_f^{0.5} + \beta_4)\eta_{ave} + (\beta_5 E_f^{0.5} + \beta_6)}{\beta_1 E_f^{0.5} + \beta_2}\end{aligned}$$

ここで、 dy/dt : 単位時間当りの汀線変動量（前進を正）、 A_{force} : 漸近の程度を表すパラメータ（漸近率）、 y_{eq} : 平衡汀線位置、 y : 汀線位置、 ε : 残差、 $y_{eq, fixed}$: 平衡汀線位置の固定効果、 r : 平衡汀線位置の不確実性を表すランダム効果、 Δy_{eq} : 基準汀線位置から平衡汀線位置までの距離、 y_0 : 基準汀線位置、 β : 係数、 E_f : 沖波エネルギーフ

---

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
3 フェロー 博(工) 九州大学大学院 工学研究院 教授

ラックス, η_{ave} : 海水位である.

本モデルにおいて, 汀線変化は波浪と海水位から計算される平衡汀線位置 y_{eq} と実際の汀線位置 y との不均衡によって生じ, 漸近率 A_{force} で現在の汀線位置が平衡汀線位置に漸近していく. すなわち, 現在の汀線位置が平衡汀線位置よりも前方にあれば汀線の後退が生じ, 後方にあれば汀線の前進が生じる.

平衡汀線位置の固定効果 $y_{eq, fixed}$ の推定式はBruun型の式(Dean, 1991)を基にした. しかしながら, 式(2)で定義した平衡汀線位置の固定効果 $y_{eq, fixed}$ は使用しているパラメータや式形状の不完全性, 考慮していないパラメータの影響などによって, 不確実性を有するものと考えられる. 実際に, 既存の平衡型汀線変動モデルで用いられている平衡汀線位置の式は様々であり, 不確実性が小さい平衡汀線位置の推定式を決定することの難しさを表している. この不確実性を考慮するために, 本モデルでは平衡汀線位置の固定効果 $y_{eq, fixed}$ に, ばらつきを与えるランダム効果 r を与えた. このような固定効果とランダム効果を含むモデルは混合モデルと呼ばれ, 潜在的な未知変数の影響を考慮できることから, 近年, その利用が広がっている. 本研究ではこのランダム効果 r を用いて不確実性の評価を行った. なお, ランダム効果 r は波浪と海水位の式から得られる平衡汀線位置 $y_{eq, fixed}$ の値だけでは説明不可能な平衡汀線位置の変化(不確実性)を表すのに対して, 残差 ε は汀線変動量のばらつき, つまりモデル自体が有する不確実性を表すものである. ランダム効果 r の時間区切りは, 月や日と短くすることも可能であるが, 本研究においては, 不確実性による長期的な平衡断面の変化を評価の対象とすることから, 年とした. つまり, ランダム効果 r は年ごとに正規分布に従って, その値が変化し, 平衡汀線位置 $y_{eq, fixed}$ にばらつきを与える.

また, 漸近の程度を表す変化率 A_{force} については, 式(3)を用いた場合は, 伴野・栗山(2013)のモデル形状(線形混合モデル)と一致する.

$$A_{force} = \beta_1 E_f^{0.5} + \beta_2 \dots \dots \dots (3)$$

しかしながら, 物理過程を考慮すると $E_f = 0$ において $dy/dt = 0$ となる必要があることから, 本研究では漸近率 A_{force} に式(4)を用いることとした.

$$A_{force} = \beta_1 E_f^{0.5} \dots \dots \dots (4)$$

式(4)の形状から, 漸近率 A_{force} は低波浪時には小さく, 高波浪時には大きい. これは堆積がゆっくりと進行するのに対して, 侵食は急激に生じるといった現地で観測される現象(例えば, 加藤ら, 1987)を表している.

図-1 前浜地形断面の平均位置とその岸沖方向のばらつき

3. モデルの推定

(1) 地形観測データへのモデルの適用

茨城県波崎海岸に位置する波崎海洋研究施設では1986年より高頻度な海浜地形断面が観測されている(図-1). 本研究では, 伴野・栗山(2011)と同様の手法で得られた地形断面のある特定の高さにおける岸沖方向の1日当りの移動量(以下, 断面変化量と呼ぶ)を求め, モデルに汀線変動量として与えることで, モデルパラメータを推定した(データ期間: 1986~2007年). 本研究では, 地形断面の変化を再現するために複数の基準高さの断面変化量を用い, その基準となる高さをD.L.+0, +0.25, +0.50, +0.75, +1.00, +1.25, +1.50, +1.75, +2.00 mとした. なお, 波崎海岸におけるL.W.L., M.W.L., H.W.L.の高さは, それぞれD.L.-0.20 m, +0.65 m, +1.25 mである. また, モデルパラメータの推定に用いた沖波エネルギーフラックス E_f は全国港湾波浪観測網(NOWPHAS)の鹿島港沖の観測地点で得られた有義波高及び有義波周期から求めた値, 海水位 η_{ave} は鹿島港内で得られた潮位であり, ともに日平均値として用いた.

(2) モデルパラメータの推定手法

本研究では, 上述した複数の基準高さでそれぞれモデルパラメータの推定を行った. モデルパラメータはRのnlmeパッケージ(Pinheiro et al., 2013)を用い, 最尤推定法により推定した. ランダム効果 r についてはその分散 σ^2 のみを最尤推定した. なお, 平衡断面の不確実性の評価には, 各基準高さにおいて推定されたランダム効果 r の分散 σ^2 及び分散 σ^2 の正規分布に従う各年のランダム効果 r の値の経時変化を用いた. ここで, 各年のランダム効果 r の値はモデルパラメータではなく, ランダム効果 r については, その分散 σ^2 のみがモデルパラメータである点に注意が必要である. また, モデルの残差 ε は分散 σ^2 の正規分布に従うと仮定した.

(3) モデルの推定結果

図-2に実測の各基準高さの日断面変化量(汀線変動量)の分散及びモデルの適合度を示す. 混合モデルにおけるモデルの適合度を表す決定係数の取り扱い, Nakagawa・Schielzeth(2013)も指摘しているように様々

図-2 各基準高さの日断面変化量のモデル推定値と実測値の決定係数及び実測の日断面変化量の分散値

であるが、本研究では式 (5) により決定係数 R^2 を算出した。

$$R^2 = 1 - \frac{s^2}{\text{var}\left(\frac{dy}{dt}\right)_{\text{obs}}} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 s^2 : モデルの残差分散, $\text{var}(dy/dt)_{\text{obs}}$: 実測の各基準高さ断面変化量の分散である。本研究で用いた平衡型汀線変動モデルの適合度は基準高さによって異なり、D.L.+1.25 mからD.L.+1.50 m付近の基準高さの断面変化には比較的適合度が高い一方で、D.L.+0.75 m以下の基準高さの断面変化については、分散が大きく、適合度が低かった。これは、H.W.L.よりも低い高さにおいては、平衡型汀線変動モデルでは十分に再現できない複雑な地形変化が生じているためであると考えられ、それにより残差分散が大きくなった、つまりモデル自体の不確実性が大きくなったと考えられる。これらの結果を踏まえ、以下ではD.L.+1.00 m以上の地形変化のみ取り扱うこととする。

また、推定されたパラメータを用いて、各基準高さで推定された平衡汀線位置の固定効果 $y_{eq, fixed}$ から平衡断面を求めた(図-3)。その結果、低波浪時には海水位よりもやや高い位置にバームが発達する傾向が見られ、高波浪時には逆にバームが消失する傾向が見られた。それに伴って、特にバームの頂部よりも低い平衡断面は波浪エネルギーが大きくなるに従って緩勾配になる傾向にあった。この傾向は砂村(1980)や加藤ら(1987)と同様の結果であり、本モデルによって十分な精度で平衡断面の議論が可能であると考えられる。また、波浪エネルギーが極端に小さい場合にも平衡断面が緩勾配化する興味深い傾向が見られたが、詳細なメカニズムは不明である。

本モデルにおいては、これらの平衡断面に対して現断面が前方にあれば平衡断面に漸近するように侵食が生

図-3 各波高に対する推定された平衡断面 ($\eta_{ave} = 0.9$ m, $T_{1/3} = 8$ sの場合)

図-4 各基準高さにおける実測の波浪に対する漸近率を表すパラメータ A_{force} の確率分布

表-1 各基準高さにおけるランダム効果、平衡汀線位置の固定効果、実測の汀線位置の標準偏差

Reference Level (m)	r	$y_{eq, fixed}$	y
	σ (m)	σ_{ye} (m)	σ_y (m)
2.00	12.9	8.4	16.7
1.75	11.3	13.2	16.0
1.50	10.6	18.2	14.9
1.25	10.5	20.3	14.3
1.00	10.5	21.1	14.1

じ、現断面が後方にあれば堆積が生じる。その漸近の程度を表すパラメータ A_{force} は、式(4)中の係数 β_1 が各基準高さで異なることによる多少の違いはあるけれども、現断面と平衡断面の差に対して低波浪時には1日当り数%程度、高波浪時(年数回波)においては1日当り10%程度の漸近率であった(図-4)。このことから、現断面が平衡断面に50%漸近するのに要する時間は低波浪時では2-4週間程度、高波浪時では1週間程度と推定された。

4. 平衡断面の不確実性の評価

(1) 平衡断面の不確実性の大きさとトレンド

推定された平衡断面の不確実性の大きさを表すランダ

図-5 (a) 年毎のランダム効果, (b) 水準間のランダム効果の差, (c) 実測の年平均前浜勾配

ム効果 r の標準偏差 σ は、いずれの基準高さにおいても $\sigma = 10$ m 程度であり、波浪エネルギーや海水位の変化に伴う平衡断面（固定効果）の変動 ($y_{eq, fixed}$ の標準偏差 σ_{ye}) の大きさと比較すると、0.5倍から1.5倍程度と大きい（表-1）ことから、この不確実性次第で地形変化にも大きな影響を及ぼすため、十分な注意が必要である。

また、過去に生じた不確実性による平衡断面の変化を表す各年のランダム効果 r の値の経時変化は、いずれの基準高さにおいても同様の長期トレンドを有していた（図-5(a)）。このことから、平衡断面は、その不確実性によって各基準高さで独立にばらつくのではなく、平衡断面全体がトレンドを有して長期的に岸沖方向に平行移動するようにばらついていることが示された。本モデルにおける平衡汀線位置 $y_{eq, fixed}$ では日平均潮位を用いているが、そのパラメータだけでは表せない日潮差や日潮不等

図-6 ランダム効果の有無による追算結果の比較(H.W.L.における地形断面の位置の時系列)

の大きさも地形変化に影響を及ぼしていると考えられることから、Tai・Tanaka（2014）が示しているような長期的な潮汐振幅の変化が、このような長期的なトレンドを有した不確実性を生じさせている可能性が考えられる。同時に、平衡汀線位置 $y_{eq, fixed}$ の式形状や使用しているパラメータの不完全性によって不確実性が生じている可能性も考えられるが、本研究においては、不確実性を生じさせる要因に関して、十分に明らかにできておらず、今後、より詳細な検討が必要がある。

なお、上述したような平衡断面の不確実性の長期的なトレンドは、長期的な地形断面の前進や後退を引き起こす。実際に、観測されたH.W.L.の地形断面の変化においても、長期的なトレンドが見られ（例えば、1998～2002年頃の長期的な地形断面の前進など）、平衡断面の不確実性を考慮しなければ、このようなトレンドを再現することは難しい（図-6）。同様に、将来の前浜地形変化を予測する場合においても、これらのトレンドを有した不確実性を、例えばマルコフ連鎖などの条件付き確率分布によって表現するなどして、将来のばらつきとして考慮しなければ、その変動を過少に予測することになり、海浜の長期的な安全性を過大評価することとなる。

(2) 平衡断面の不確実性に伴う変化

前節では、各水準の平衡断面の不確実性の長期的なトレンドを示したが、その傾向には僅かな違いが見られた。水準間のランダム効果 r の差は平衡断面の勾配の不確実性を表す（急勾配化が正方向）が、特にH.W.L.付近の平衡断面が1997年以降、不確実性によって経時的に急勾配化している傾向が示された（図-5(b)）。また、図中には示していないけれども、平衡汀線位置の固定効果 $y_{eq, fixed}$ から得られる平衡断面の勾配には経時的な急勾配化の傾

向は見られなかった。つまり、本モデルの固定効果では説明不可能な不確実性による平衡断面の急勾配化が生じていると考えられ、これに対応して実測の前浜勾配にも急勾配化の傾向が見られた(図-5(c))。この不確実性による平衡断面の急勾配化はモデルの平衡汀線位置の式では考慮されていない底質粒径の粗粒化などによって生じている可能性が考えられる。柳嶋(2013)は2006年10月に波崎海岸に来襲した高波浪による大規模な侵食に伴って前浜の底質粒径が粗粒化し、前浜勾配が急になったことを示した。柳嶋(2013)の結果と本研究で得られた結果とを併せて総合的に評価すると、1997年以降、徐々に底質粒径の粗粒化などにより平衡断面が急勾配化した、つまり実断面が潜在的に急勾配化しやすくなった後、2006年の高波浪によって実際の断面勾配が一気に急勾配になったと同時に、底質粒径もさらに粗粒化が進行したと推察される。

以上をまとめると、平衡断面には長期的な前後の平行移動と僅かな勾配の変化という二つの不確実性による変動が生じていることが示された。

5. おわりに

本研究では、前浜付近の物理的現象を比較的高精度かつ合理的に再現可能である半経験的な平衡型汀線変動モデル(非線形混合モデル)を構築し、そのモデルパラメータの一つであるランダム効果を用いて前浜の平衡断面の不確実性を評価した。

構築したモデルはH.W.L.付近で実測値への適合度が高いが、M.W.L.付近では適合度が低かった。また、推定されたH.W.L.付近の平衡断面については、波浪に対する勾配の変化やバームの形成を再現できており、現断面がこの平衡断面に漸近していく割合は低波浪時で1日当り現断面と平衡断面の差の数%程度、高波浪時で1日当り10%程度と推定された。

また、平衡断面の不確実性を評価した結果、波浪や海水位によって推定される平衡断面の変動と同程度の不確実性による平衡断面の変動が生じていることが示された。また、その不確実性は平衡断面を長期的に平行移動させ、実断面に長期的な堆積や侵食を生じさせていることが示された。同時に、不確実性によって平衡断面が経時的に急勾配化している傾向が見られ、本モデルで考慮していない底質粒径の変化などが生じている可能性が示唆された。

本研究では、これまでほとんど検討されていなかった平衡断面の不確実性の大きさやトレンド、それに伴った平衡断面勾配の変化を具体的に示した。これらの不確実

性に関する知見は、将来予測を行う上で非常に重要かつ必要不可欠なものである。しかしながら、不確実性が生じる要因に関しては十分に明らかにされておらず、今後の検討課題とする必要がある。

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。本研究を進めるにあたって、(独)港湾空港技術研究所、中川康之氏、柳嶋慎一氏とは非常に有益な議論を行った。ここに記し感謝の意を表する。また、本研究の一部は文部科学省委託事業気候変動リスク情報創生プログラム「課題対応型の精密な影響評価」のもとで行われた。

参考文献

- 加藤一正・柳嶋慎一・村上裕幸・末次広児(1987):汀線位置の短期変動特性とそのモデル化の試み, 港研報告, Vol.26, No.2, pp.686-690.
- 砂村継夫(1980):自然海浜における汀線位置の時間的変化に関する予測モデル, 第27回海岸工学論文集, pp.255-259.
- 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.
- 伴野雅之・栗山善昭(2013):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, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.69, No.2, pp.63-96.
- 柳嶋慎一(2013):台風強化に伴い砂浜海岸で想定される地形変化と底質粒径変化に関する検討, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.69, No.2, pp.551-555.
- Davidson, M.A., R.P. Lewis and I.L. Turner (2010): Forecasting seasonal to multi-year shoreline change, Coastal Engineering, Vol.57, pp.620-629.
- Davidson, M.A., K.D. Splinter and I.L. Turner (2013): A simple equilibrium model for predicting shoreline change, Coastal Engineering, Vol.73, pp.191-202.
- Dean, R.G. (1991): Equilibrium beach profiles: characteristics and applications, Journal of Coastal Research, Vol.7, No.1, pp.53-84.
- Miller, J.K. and R.G. Dean (2004): A simple new shoreline change model, Coastal Engineering, Vol.51, pp.531-556.
- Nakagawa, S. and H. Schielzeth (2013): A general and simple method for obtaining R² from generalized linear mixed-effects models, Methods in Ecology and Evolution, Vol.4, pp.133-142.
- Pinheiro, J., D. Bates, S. DebRoy, D. Sarkar and the R Development Core Team (2013): nlme, Linear and Nonlinear Mixed Effects Models, R package version 3.1-113.
- Tai, A. and K. Tanaka (2014): Secular Changes in the Tidal Amplitude and Influence of Sea-Level Rise in the East China Sea, Journal of Disaster Research, Vol.9, No.1, pp.48-54.
- Yates, M.L., R.T. Guza and W.C. O'Reilly (2009): Equilibrium shoreline response: observations and modeling, Journal of Geophysical Research, Vol.114, C09014.