画像記録装置を用いた汀線変化の高頻度モニタリングとモデル化

Frequent Monitoring and Numerical Modeling of Shoreline Change based on Automated Image Recording System

溝口完司¹ · 田中 仁² · 山路弘人³

Kanji MIZOGUCHI, Hitoshi TANAKA and Hiroto YAMAJI

A monitoring method is applied to Yokosuka Coast in Miyagi Prefecture for understanding short-term topography change induced by wave action. Using images from an automated digital camera installed on the coast, shoreline position is determined after correcting the influence of wave run-up and tidal variation. Observed shoreline on the southern coast shows temporal variation in response to wave motion, whereas in the northern part of the study area, shoreline advancement is predominantly observed due to consistent recovery of the river mouth sand bar. Furthermore, a simple numerical modeling based on linear response function is applied to the present data set to reproduce the measured short-term shoreline variation.

1. はじめに

一般に海浜地形は外力のもとに複雑な変化を示す.こ のため、測定頻度の低い深浅測量結果や画像データなどを 使用した場合,その間の地形変化と外力との間の因果関係 を明らかにすることが困難な場合がある.空中写真は広域 の地形情報を一度に捉えることが出来る利点を有し,これ を活用することによりこれまでも優れた成果が残されてき た(例えば,田中ら,1973).しかし,国土地理院による 空中写真は数年に一度の撮影頻度であることが多いことか ら、先述の問題点を有している.一方,独自に撮影を行う 場合には,これが高価であることから,高頻度で海浜地形 撮影を行う際には経費の問題を伴うこととなる.深浅測量 に関しても,同様な問題点を有している.

近年,海浜地形のモニタリングにビデオ装置などの新 たな電子機器が使用され,旧来の深浅測量や空中写真な どに比べてきわめて高頻度のモニタリングがなされた事 例が散見される(例えば,Aarninkhof and Roelvink (1999);Aarninkhof et al. (2000);Alport et al. (2001);鈴 木ら(2005);藤原ら(2007).ただし,これらの画像はあ る瞬間の映像であるため,潮位および波の遡上の補正が 必要であるが,特に,後者についてはその補正方法を詳 細に検討した事例が見られない.そこで,本研究におい ては宮城県三陸海岸に位置する横須賀海岸を対象にし て,まず,現地測量との比較をもとに,波の遡上高さを 精度高く補正する手法について検討を行った.さらに, 得られた高頻度汀線データに対して線形応答モデルを適 用し,モデルの再現性に関する検討を行った.

1 正会員 修(工) 鹿島建設株式会社東京建築支店 2 フェロー 工博 東北大学大学院工学研究科土木工学 3 正会員 東北大学大学院工学研究科土木工学	島建設株式会社東京建築支店 北大学大学院工学研究科土木工学専攻 北大学大学院工学研究科土木工学専攻)	修(ゴ 工博	正会員 フェロー 正会員	1 2 3
---	---	---	-----------	--------------------	-------------



図-1 横須賀海岸の位置

2. 研究対象と研究方法

(1) 対象海岸

本研究の研究対象領域は図-1に示す宮城県北東部に位置する横須賀海岸である.横須賀海岸は全長約2kmの砂浜海岸で,北側に一級河川・北上川河口が位置している. 南側には海跡湖である長面浦が位置しており,感潮狭水路を通じて海に繋がっている.

横須賀海岸においては、近年急激な海岸侵食が進行した.中でも平成18年10月の冬期大型低気圧による暴波 浪により大規模な侵食が生じ、海岸後背地にまで越波に よる海水流入が生じた.この侵食発生を受けて、捨石を 用いた護岸による応急対策工事を行われている(本郷ら、 2008).この様な背景から、同海岸を対象として海浜地 形のモニタリングを行った.

(2) 画像記録装置の概要

横須賀海海岸の汀線変動データを得る手段として、本 研究においてはコーナーシステム社製・KADEC-21-



写真-1 画像の一例(南側海浜)



写真-2 画像の一例(北側海浜,北上川河口部)

EYE2を採用した.撮影は2007年4月から開始し,自動 的に1時間に1回,海岸を撮影し即時に記録・蓄積を行 う様に設定を行った.バッテリー内蔵式であり,1時間 ごとの撮影頻度では約2か月間の連続使用が可能である.

写真-1,写真-2は撮影された画像の一例であり,それぞ れ,対象海岸の南側および北側を示している.写真-2の上 半分に広がる砂浜は北上川河口砂州の一部である.いずれ においても明瞭な画像が得られていることが確認される.

(3) その他の入手データ

海岸を撮影した写真画像から精度の高い汀線位置を得 るために、潮汐・波浪による影響についての二つの補正 処理を行った.このために、潮汐データは横須賀海岸か ら約30km離れた鮎川潮位観測所での値を入手した.潮 汐データはすべて*T.P.*=0mを基準にした値を用いた.ま た,波浪データは気象庁江ノ島観測所から入手した.江 ノ島観測所は横須賀海岸から約20km離れた場所に位置 し,波浪データを毎時観測しており、その内容は波高・ 周期などである.なお、本研究では波浪データをすべて 有義波高で統一している.

3. 汀線位置決定手法と観測結果

(1) 汀線位置決定手法

自動画像記録装置から得られた波打ち際の画像を,潮 汐・波浪による遡上の補正を行って汀線位置の決定を行 った.本研究では*T.P.*=0mにおける波打ち際を汀線位置 として統一して定義している.

図-2は潮汐・波浪の遡上による影響の補正の概要を図示したものであり、図中で∆hは画像撮影時の潮位である. まず、画像より、波の遡上により砂の色の急変が見られ る境界を定め、これを遡上端とした.別途、現地におい て測線に沿う断面測量を行い、基準点からの実距離に変 換するための比率を定めている.

次に,波浪による遡上の補正分は,Hedges・Mase (2004)による修正版Hunt (1959)の式を用いて平均海面高 さからの差として求め,さらに,平均的な海浜勾配で除 することで水平距離として求めた.潮汐による補正分も 同様で,T.P.=0(m)海面高さからの差を求めた後,海浜 勾配で除して水平距離を補正分とした.以下にHedges・ Mase (2004)によるHunt (1959)の修正式を示す.

 $R = (0.27 + 1.04\xi)H_0$ (1)

ここで,

 $\xi = \tan \alpha / \sqrt{H_0/L_0} \qquad \dots \qquad (2)$

であり、適用範囲は、

 $0.13 < \xi < 2.2$ (3)

である.上式中で, *R*は波浪の遡上位置と平均海面高さ との差を表し, *H₀*, *L₀*は沖波波高, 沖波波長, tanαは海 浜勾配である.

図-2において, y_1 は写真-1に示すように画像上における基準点から波打ち際までの水平距離で, y_2 は y_1 から波浪による遡上の影響を補正した汀線位置であり, y_3 は y_2 にさらに潮汐の補正を行った水平距離である.

以下では、ここで定義された*y*₁, *y*₂, *y*₃の記号を使用 し、それぞれの特性について示す.



(2) 観測結果

図-3は2007年4/13から5/31までのy₁, y₂, y₃の位置を 時系列にプロットしたものである.ただし,対象海浜の うち,南側の側線に沿う変動を示している.黒太線が最 終的な補正結果であるy₃であるが,図から潮汐・波浪に よる遡上の影響が差し引かれるに従ってデータが平滑化 されているのが確認できた.以上のように平滑化された 汀線位置変化データを入手できれば,汀線変化の短期間 におけるトレンドも把握することが可能である.



なお、図-3の上段には次式で定義される Sunamura・ Horikawa (1974)による C_s 値を時系列でプロットして いる.

ここで, D: 底質粒径である. 汀線変化とCsには比較 的良好な対応関係が見られる.

一方,図-4は,北上川河口部での汀線位置yとC_sの関 係を示している.なお,図には前述のy₃に相当する汀線 位置を示している.この時期,河口砂州が回復過程にあ ったことから,汀線位置とC_sとの間に明瞭な相関関係は 見られない.ただし,出水時に河口前面に堆積した土砂 が回帰する過程についてきわめて詳細な地形データを提 供している.

以上から,潮汐と波の遡上の影響を考慮すれば静止画 像からも汀線位置を算出することが可能であることが判 明した.

4. 線形応答モデル

図-3では、例えば図中の4月18日のCs値が高くなって いる時に、4月18日から4月23日の汀線位置は後退の変 化を示していることがわかる.また、別の高波浪が来襲 している5月8日と5月12日においても、汀線変化はいず れも侵食傾向を示す.この様に、図中の汀線変動と Sunamura・Horikawa (1974)によるCs値との間には相関 関係が見られる.そこで、本研究で得られた二箇所での 観測結果のうち、南側の海浜を対象として観測汀線変動 と外力との関係について議論を行う.

(1) モデルの概要

ここでは汀線位置変化のモデリングに線形応答モデル (Khang・田中,2008)を採用した.このモデルは汀線変 動を線形応答系と仮定し畳み込み積分を応用することに より得られるものであり,外力条件が正弦的変化・余弦 的変化・一定条件のそれぞれについて解析解を求めるこ とが可能である.このため,外力をフーリエ級数展開し, それぞれに対する基本解を重ね合わせることにより,任 意の外力条件に対して解析的に解を得ることが可能であ る点に大きな特徴がある.以下に線形応答モデルの基礎 式を示す.

ここで、 $y_S(t)$:時刻tにおける汀線位置、a:汀線の変 化速度を示す係数、 T_S :外力に対する地形変化の応答に 関する時間の係数である.ここで、式(5)における C_0 は、侵食・堆積の境界に対応する Sunamura・Horikawa (1974)による C_s 値である.

(2) 各種外力に対する解析解について

まず,次式のように正弦的外力を想定する.

ここで、A:振幅、 σ :角振動数、 T_D :波浪作用時間 である.式(6)を式(4)に代入すると正弦外力に対す る解析解である次式を得ることができる.

$$y_{s}(t) = \frac{aAT_{D}}{2\pi} \left(1 - \frac{\beta^{2}}{1 + \beta^{2}} \left(\beta \sin \sigma t + \cos \sigma t + \beta^{2} e^{-\sigma t/\beta} \right) \right) \cdots (7)$$

また,

$$\beta = \sigma T_s = 2\pi \frac{T_s}{T_p} \qquad (8)$$

である.次に余弦外力を表した式を示す.

$$C_0 - C_S(t) = B\cos\left(\frac{2\pi}{T_D}t\right) = B\cos(\sigma t)$$
(9)

ここで, B:余弦的変化の振幅である.式(9)を式 (4) に代入すると余弦外力に対する解析解である次式を 得ることができる.

$$y_{\mathcal{S}}(t) = \frac{aBT_{D}}{2\pi} \left(1 - \frac{\beta^{2}}{1+\beta^{2}} e^{-\frac{t}{T_{\mathcal{S}}}} + \frac{\sin \sigma t}{1+\beta^{2}} - \frac{\beta \cos \sigma t}{1+\beta^{2}} \right) \quad \cdots (10)$$

さらに、一定外力を以下のように定義する、

$$C_0 - C_s(t) = -A_0$$
(11)

ここで、Ao: 定数である.式(11)を式(4)に代入 すると一定外力に対する解析解である次式を得ることが できる.



(3) 計算結果

全観測期間において堆積が顕著であった期間は4期間, また侵食が顕著であった期間は6期間存在した.これら の堆積と侵食が顕著である期間に対し正弦・余弦・一定 外力に対する解析解を求め、それらの重ね合わせを行っ た上での計算結果と誤差の平均値をとり、それぞれの期 間と比較し誤差の平均値が最も小さい係数aとTsの組み 合わせの範囲を決定した.

各期間において計算が行われ、実測値との平均誤差を 最小とするものを採用した結果,得られた係数の範囲は 堆積が $T_s = 0.25$ dayで0.2m/day $\leq a \leq 0.4$ m/dayであり侵食 が $T_s = 0.25$ dayで0.3m/day $\leq a \leq 0.5$ m/dayであった. また, 既往の研究を参照して、Ca=16とした.以上のように、 侵食時においてより大きな汀線変化速度であることが確 認された.

図-5 (a) と図-5 (b) は一つの期間における汀線の侵 食である後退と堆積である前進の両方の計算結果を示し たものである. 汀線の前進・後退のいずれのケースにお いても、モデルにより実測値の変化を良好に再現できる ことが確認できた.

図-6は線形応答モデルによる汀線の計算結果であり、 2008年7月1日から12月31日までの変動の計算結果であ る.長期間の計算を行い誤差の小さい係数を同定するた めそれぞれの定数を $C_0 = 16$ から $C_0 = 14$ に変更し、堆積 の係数をa = 0.10m/day, 侵食の係数をa = 0.20m/day, $T_s = 0.25 day$ のように全体的に変化が小さいように設定 し、数値解による計算を行った.図-5に示した結果を得 る際には解析解を用いて係数aとCsを単一の組み合わせ により計算を行っていた.数値解をもちいて計算を行う 理由は、堆積と侵食のそれぞれについて係数aとT。それ ぞれ異なる組み合わせを用いて一つの計算期間に同時に 侵食と堆積の二つの要素を考慮に含めて計算ができるこ とにある、これにより、比較的長期間の計算でも実測値 に近い再現結果を求めることができる.





図-6によれば、モデルにより実測値の長期的なトレンドは捉えているものの、乖離の見られる時期も存在している。今回の対象地点は約2kmに及ぶ砂浜海岸のほぼ中央に位置するために、沿岸漂砂の影響を無視しているが、長期的なデータにはその影響も存在しているものと考えられる。今後、定数としている係数*a*と*Ts*についてさらに検討を行うとともに、沿岸漂砂の効果等も含めて、モデルの適用性についてより詳細な検討を行う必要がある。

5.おわりに

本研究では、自動画像記録装置により、宮城県横須賀 海岸において信頼度のある汀線データを得ることが出来 た.実測によれば、南側の海浜において夏季から冬季に かけて汀線前進・後退を繰り返しながら全体的に後退傾 向にあることが確認された.一方,北側の北上川河口砂 州部では砂州地形の回復過程が確認された.また、得ら れた汀線変動データに線形応答モデルを適用し、海岸地 形変化の傾向を再現した.

謝辞:本研究を実施するに当たり,宮城県石巻土木事務 所より貴重な現地資料の提供ならびに現地調査実施の際 の便宜を受けた.また,本研究に対して日本学術振興会 科学研究費(No.21360230)の補助を受けた.ここに記 して関係各位に深甚なる謝意を表する.

参考文献

- 鈴木高二郎・小澤康彦・村上俊春・武田 晃:ビデオ画像を 用いた住吉海岸における沿岸流の長期連続観測,海岸学 工論文集,第52巻,pp.601-605,2005.
- 田中則男・小笹博昭・小笠原昭(1973):海浜変形調査資料 (第1報) - 航空写真による汀線変化の解析(東日本 編)-,港湾技術研究所資料, No.163, pp.1-95.
- Truong Thien Khang · 田中 仁 (2008): 汀線変動に対する線 形応答モデルの現地データへの適用,海岸工学論文集, 第55巻, pp.486-490.
- 藤原 要・的場孝文・熊谷隆則・藤田裕士・堀口敬洋・佐々 木崇雄・高木利光 (2007):カメラ観測システムを用いた 宮崎海岸の土砂移動機構調査,海岸工学論文集,第54巻, pp.671-675.
- 本郷久美子・田中 仁・舛谷成幸・高木利光・佐々木崇雄 (2008):南三陸横須賀海岸の侵食機構に関する研究,海岸 工学論文集,第55巻, pp.691-695.
- Aarninkhof, S.G.L. and J.A. Roelvink. (1999): ARGUS-based monitoring of intertidal beach morphodynamics, Proc. of Coastal Sediments Conf., pp.2429-2444.
- Aarninkhof, S.G.L., M. Caljouw, and M.J.F. Stive (2000): Videobased quantitative assessment of intertidal beach variability, Proc.27th Int. Conf. on Coastal Engineering, pp.3291-3304.
- Alport, M., J. Basson, G. Mocke, J. Naicker, and C. Saltau, (2001): Discrimination and analysis of video imaged shorelines and nearshore processes, Proc. of Coastal Dynamic Conf., pp.989-997.
- Hedges, T. S. and H. Mase (2004) : Modified Hunt's equation incorporating wave setup, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol.130, No.3, pp.109-113.
- Hunt, I.A. (1959) : Design of seawalls and breakwaters, Journal of Waterways and Harbours Division, ASCE, Vol.85 (WW3), pp.123-152.
- Sunamura, T. and K. Horikawa (1974): Two-dimensional shore transformation due to waves, Proc. 14th Conf. Coastal Engineering, pp.920-938.