海面上昇に伴う全国砂浜侵食量の推定

Projection of Shoreline Retreat due to Sea Level Rise along Japanese Coasts

須川太一¹・有働恵子²・三村信男³・真野 明⁴

Taichi SUGAWA, Keiko UDO, Nobuo MIMURA and Akira MANO

Sea level rise due to climate change is expected to increase coastal erosion and thus result in serious coastal disasters. Along the Japanese coasts, existing projections of the sea level rise show 9-27 cm rise at the end of 21st century; however, there is few study on its effect on the Japanese coastal erosion after Mimura et al. (1994). In this study, observed wave and tidal data were analyzed to investigate characteristics of their long-term trends and then future beach erosion along the Japanese coasts was projected using the Bruun rule for SRES A1B scenario. The observed data analyses demonstrate that the annual average and maximum tide levels and the annual maximum wave height tended to increase at rates of 0.4, 0.4 and 3.9 cm/yr, respectively, in recent decades. Due to these factors, beach erosion was projected to be 10-50 m.

1. はじめに

気候変動に伴う海水の熱膨張や氷河融解などを主たる原因とした海面上昇が懸念されている。北太平洋海洋モデル (NPOGCM) を用いて算定された、温室効果ガス排出量の将来変化シナリオ (IPCC SRES A1B シナリオ) に基づく気象庁 (2008) の計算結果によれば、日本近海の100年後の平均海面上昇量は1981～2000年と比較して9～27cmと予測されている。この予測では、熱膨張による海面上昇のみを考慮しており、これにグリーンランドの氷床融解など陸水の縮小による寄与を考慮すれば、さらに海面上昇量は増大すると考えられる。中野ら (2002) は、1980年代以降の日本近海の潮位観測データ解析結果に基づき、海水温上昇の影響を受けて平均海面が上昇していることを示している。

一方で、気候変動による波浪特性の変化も懸念される (例えば、間瀬ら, 2009)。森ら (2009) は、A1B シナリオに基づく波浪予測計算を行い、日本近海においては1979年から2003年の平均値と比較して21世紀末 (2075～2099年) の平均波高は減少するものの、最大波高が増大することを示している。

以上のように、長期的に海面が上昇し、最大波高が増大すれば、砂浜侵食リスクが増大し汀線が後退する。沿岸域に人口が集中する我が国では、汀線後退によって多大な人口や資産への影響が懸念されるものの、三村ら (1994) 以降、これらの長期的な外力変化の砂浜侵食への影響評価に関する研究は見当たらない。本研究では、

これらの砂浜侵食への影響を評価するため、気象庁の潮位観測記録から最近の約40年間における潮位の経年変化特性を、全国港湾海洋波浪情報網 (NOWPHAS) の波高観測記録から最近の約20年間における波高の経年変化特性の解析を行うことにより、近年の長期的なトレンドを把握し、Bruun則 (1962) を用いてこれらの影響を考慮した全国の砂浜侵食量の推定を行うことを目的とする。

2. 全国の潮位の経年変化

日本全国の潮位データとして、気象庁の潮位観測データを用いた。観測記録は最長で1961年から2008年までで、一時間毎に取得された潮位が記録されている。40年程度の観測記録が得られた観測地点のうち、地殻変動に関する情報が入手できた地点を対象とし、野口ら (2010)

図-1 鹿児島県の年平均潮位

図-2 鹿児島県の年最大潮位

1 学生会員	学(工)	東北大学工学研究科土木工学専攻
2 正会員	博(工)	東北大学准教授
3 正会員	工博	茨城大学教授
4 正会員	工博	東北大学教授

図-3 鹿児島県の平均潮位観測値と予測値

図-4 全国の年平均潮位トレンド分布

図-5 全国の年最大潮位トレンド分布

と同様に地殻変動の影響を排除した後、各地点の年平均潮位および年最大潮位の変化傾向を求めた。

観測潮位データ例として、鹿児島観測地点（北緯 $31^{\circ}35'$ ，東経 $130^{\circ}34'$ ）の年平均潮位と年最大潮位の経年変化（1965年～2008年）を、図-1および図-2にそれぞれ示す。また、鹿児島の年平均潮位と、北太平洋海洋モデル（NPOGCM；気象庁，2008）の計算結果に陸氷融解による海面上昇寄与量（ 1.2 mm/year ；IPCC，2007）を加えた値との比較を図-3に示す。潮位の値は標高で示した。鹿児島の年平均潮位は 0.41 cm/year の増加傾向に、年最大潮位は 0.70 cm/year 増加傾向にあった。平均潮位につ

図-6 鹿児島県の年平均有義波高

図-7 鹿児島県の年最大有義波高

いては、1980年～2000年代半ばまで観測値と予測値のトレンドが概ね一致し、将来にわたりこれまでと同等のトレンドで平均潮位は上昇すると予測されている。

全国各地の潮位観測データについて得られた年平均潮位と年最大潮位のトレンドを図-4と図-5に示す。多くの地点で、鹿児島と同様の年平均潮位および年最大潮位の増加傾向が認められた。年平均潮位の全解析対象地点のトレンド平均は 0.39 cm/year で、年最大潮位の全地点のトレンド平均は 0.35 cm/year であった。以上より、少なくとも1980年代以降は日本周辺の海面が上昇していたと考えられる。

3. 全国の波高の経年変化

全国的な波浪観測記録として全国港湾海洋情報網（NOWPHAS）を用いた。入手した観測記録は最長で1991年から2008年までで、月毎の平均有義波高や最大有義波高等が記録されている。8年以上の観測記録が得られた地点について、各地点の年平均有義波高および年最大有義波高の変化傾向を求めた。

波浪データ例として、鹿児島観測地点（北緯 $31^{\circ}33'20''$ ，東経 $130^{\circ}34'21''$ ）の年平均有義波高と年最大有義波高の経年変化（1991年～2008年）を図-6および図-7にそれぞれ示す。鹿児島では、年平均有義波高のトレンドは -0.17 cm/year で、若干の減少傾向にあったものの、年最大有義波高は 3.88 cm/year の増加傾向にあった。年平均有義波高と年最大有義波高の全国的なトレンドを図-8および図-9に示す。日本海側を中心に多くの地点で年平均有義波高の減少傾向が見られ、全解析対象地点のトレンド平均は -0.30 cm/year であった。一方で、年最大有義波高については、東日本側を中心に増加傾向が認められ、

図-8 全国の年平均有義波高トレンド分布

図-9 全国の年最大有義波高トレンド分布

全地点のトレンド平均は0.96 cm/yearであった。以上より、少なくとも最近の十数年は日本周辺の年最大波高が增大していたと考えられる。

4. 全国の砂浜侵食量の推定

(1) 砂浜侵食モデル

第2～3章で、少なくとも1980年代以降は日本近海において海面は上昇傾向にあり、年平均有義波高は日本海側を中心に減少傾向に、年最大有義波高は東日本を中心に増加傾向にあることが示された。海面上昇と最大波高の増大は砂浜の侵食リスクの増大を意味する。ここでは、得られた結果を用いて、Bruun則（1962）を用いて将来の砂浜侵食量の推定を行った。

Bruun則は簡便で、沿岸漂砂の影響を考慮できない等の制約があるものの（Cooper and Pilkey, 2004）、検証例が多数存在し（例えば、三村ら, 1994）、また、これに代わる長期侵食予測モデルが存在しないことから、現在も多くの研究で用いられている（FitzGerald et al., 2009; Ranasinghe and Stive, 2009）。Bruun則では、汀線付近の断面地形には底質粒径と波浪条件から決定される平衡断面地形が存在すると仮定し、その地形は次式で表される。

$$h_s = Ay^{2/3} \quad \dots\dots\dots (1)$$

h_s は水深、 A は海浜断面係数、 y は沖方向の距離である。 A は砂浜の底質粒径と強い相関があることが指摘されており、Dean（2002）によってその関係性が整理されており、この平衡断面地形は、海面上昇が起きると式（1）の形状を保ちながら海面上昇量分上方へ移動するとともに陸側にも移動し、汀線が後退すると仮定されている。この海面上昇量と汀線後退量の関係が導かれた式がBruun則であり、次式で表される。

$$\Delta y/W_s = -S/(h_s + B_h) \quad \dots\dots\dots (2)$$

Δy は汀線後退量、 h_s は土砂移動限界水深、 W_s は土砂限界水深までの水平距離、 S は海面上昇量、 B_h はバームの高さを表す。 h_s はHallemeier（1978）による式（3）を用いて算定する。

$$h_s = 2.28 \bar{H}_m - 68.5 \left(\bar{H}_m^3 / g \bar{T}_m^3 \right) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$\bar{H}_m$ は年最大有義波高の観測値の平均値、 $\bar{T}_m$ は年最大有義波周期の観測値の平均値、 g は重力加速度を示す。 W_s は、式（1）に粒径により与えられる A と式（3）より算定される h_s を代入して求められる y で与える。 B_h は、武田・砂村（1983）の式を用いて算定する。

$$B_h = 0.125 \bar{H}_b^{5/8} \left(g \bar{T}_s^2 \right)^{3/8} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$\bar{H}_b$ は $\bar{H}_s$ に対する碎波波高、 $\bar{H}_s$ は年平均有義波高の観測値の平均値、 $\bar{T}_s$ は年平均有義波周期の観測値の平均値を表す。 $\bar{H}_b$ は砂村（1983）の式（5）により算定する。

$$\bar{H}_b / \bar{H}_s = (\tan \alpha)^{0.2} (\bar{H}_s / \bar{L}_s)^{-0.25} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$\tan \alpha$ は海底勾配、 $\bar{L}_s$ は年平均有義波長を表す。年平均有義波長は年平均有義波周期の観測値の平均値から求めた。

以上より、砂浜の粒径、海底勾配、波浪条件から侵食量を推定することができる。

(2) 計算条件

推定対象とする砂浜としては、清水ら（1998）の海浜変形事例文献リスト記載の論文のうち、海岸の海底勾配および底質粒径のいずれについても記載がある計42の砂浜を選定した（図-10、図-11）。

推定に用いる海面上昇量として、NPOGCMによって予測されたAIBシナリオにおける21世紀末（2081～2100年）までの海域別平均海面上昇量に、氷河・氷床融解等による全雪氷圏の海面上昇への寄与量（1993～2003年）の中央値平均（1.2 mm/year；IPCC, 2007）を加えた値を使用する（図-12）。平均海面上昇量とは、1981年から2000年までの平均海面に対する、NPOGCMによる1981

図-10 推定対象海岸の海底勾配分布

図-13 推定対象海岸の年平均有義波高 (NOWPHAS)

図-11 推定対象海岸の底質粒径分布

図-14 推定対象海岸の年最大有義波高 (NOWPHAS)

図-12 推定対象海岸の海面上昇量 (NPOGCM + 陸水寄与量)

図-15 Bruun則による21世紀末の砂浜侵食量推定結果

年から2100年の将来予測の一次回帰分析によって求められた100年あたりの変化量である。

波浪データとしては、ナウファスの観測データを用いて、農林水産省構造改善局ら（1990）の77の沿岸区分に対してそれぞれ波浪条件を与えた。決定方法は幾世橋ら（1995）と同様に、各沿岸区域内の観測地点でのデータから年平均有義波高、年平均有義波周期、年最大有義波高、年最大有義波周期の観測値の平均値を計算し、これらに波浪のトレンド値から求めた100年あたりの変化量

（年平均有義波高-29.7cm/100years、年最大有義波高95.8cm/100years）を加えた値を用いた（図-13、図-14）。区域内に観測地点が存在しない場合は、隣接する区域内の観測地点におけるデータで代用した。

(3) 推定結果

Bruun則を用いて推定した21世紀末の日本全国の侵食量分布を図-15に示す。対象海岸における推定後退量は、7.8～68.1 mであった。粒径が小さい地点では侵食量が大きくなった。ここで推定対象とした海岸の平均侵食量は

25 mで、対象海岸のうち半数以上の海岸で20 mをこえる汀線後退が推定された。ただし、侵食量は実際の砂浜幅を超えることはないものの、今回の推定結果ではこれを考慮しておらず、砂浜幅以上の侵食量と推定した可能性があるなど、今後これらについて検討する必要がある。

また、推定の際に波浪の長期観測結果を用いて算出したトレンドを用いているものの、20年前と現在では、高波浪時のデータ欠損の頻度等、計測器の精度が異なる。感度分析を行った結果、最大波高が1m大きくなることによる侵食量の過大評価は最大10m程度と考えられる。現時点では波浪の将来予測データが存在しないため、過去の長期観測結果より得られたトレンドを用いたが、気候予測に基づく波浪の将来予測データが公開予定である。今後は、こうしたデータを用いて、気候変動の程度に応じた侵食量変化の検討などが課題である。

6. 結論

全国の潮位・波浪の経年変化特性について解析した結果、少なくとも1980年代以降は、年平均潮位および年最大潮位は全国的に増加傾向にあった。また年平均有義波高は日本海側を中心に減少傾向であったものの、年最大有義波高は東日本側を中心に増加傾向にあった。これらを考慮し、Bruun則を用いて将来の砂浜侵食量を推定した結果、21世紀末(2081~2100年)までに、海面の上昇と波高の長期変化によって平均的に25 m程度汀線が後退する可能性があるとして推定された。

現状においても、主に1960年代以降の急速な沿岸域の開発や海岸構造物等の造成に起因して全国各地の砂浜で深刻な侵食が生じており、多くの研究がなされてきたものの、本研究で示した気候変動の砂浜侵食への影響については考慮されなかった。しかし、長期的には気候変動の影響が顕在化してくる可能性が高く、この影響にも配慮した海岸管理が望まれる。

謝辞: 本研究は、環境省の環境研究総合推進費(S-8-1(4))の支援により実施された。気候変動予測データの取り扱いについては、東北大学風間聡教授にご助言いただいた。各観測データ整理においては、武田百合子氏にご助力いただいた。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 幾世 橋 慎・三村 信男・加藤 始・古米 弘明・信岡 尚道 (1995): 平衡海浜地形の仮説に基づいた砂浜に対する海面上昇の影響予測, 平成6年度学位論文, 142p.
- 気象庁 (2008): 地球温暖化予測情報, 第7巻.
- 清水ら (1998): 海浜変形事例文献リスト, 漂砂環境の創造に向けて, 土木学会, pp.204-216.
- 砂村 継夫 (1983): 波による海岸地形の変化, 地形, 第4巻, 第2号, pp.179-188.
- 武田 一郎・砂村 継夫 (1983): 砂浜の堆積過程における地形変化, 海岸工学講演論文集, 第30巻, pp. 254-258.
- 農林水産省構造改善局・農林水産省水産庁・運輸省港湾局・建設省河川局 (1990): 全国海岸域保全利用計画調査報告書, 336p.
- 中野 晋・田所 真路・宇野 宏司・藤本 雅彦 (2002): 日本沿岸の潮位に見られる長周期変動と温暖化の影響, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 1351-1355.
- 野口 賢二・諏訪 義雄・五味 久昭・松藤 絵理子 (2010): 気候変動適応に向けたわが国沿岸の既海面上昇基準量の設定にむけて, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.66, No.1, pp. 1256-1260.
- 間瀬 肇・田中 遼・森 信人・安田 誠宏 (2009): 日本海沿岸における波浪の経年変化特性に関する研究, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 65, No.1, pp. 1251-1255.
- 三村 信男・幾世 橋 誠・井上 馨子 (1993): 砂浜に対する海面上昇の影響評価, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 1046-1050.
- 三村 信男・井上 馨子・幾世 橋 誠・泉宮 尊司・信岡 尚道 (1994): 砂浜に対する海面上昇の影響評価 (2) 予測モデルの妥当性の検証と全国規模の評価, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 1161-1162.
- 森 信人・岩嶋 亮太・安田 誠宏・間瀬 肇・T. 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.
- Bruun, P. (1962): Sea-level rise as a cause of shore erosion, J. Waterways and Harbors Div., ASCE, 88 (WW1), pp. 117-130.
- Dean, R. G. (2002): Beach Nourishment: Theory and Practice, Advanced Series on Ocean Engineering, Vol. 18, pp. 32.
- Hallermeier, R. J. (1980): A profile zonation for seasonal sand beached from wave climate, Coastal Engineering, Vol. 4, pp. 253-277.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007): Climate Change 2007: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by S. Solomon et al., Cambridge Univ. Press, New York.
- Cooper, A. J. G. and O.H. Pilkey (2004): Sea-level rise and shoreline retreat: time to abandon the Bruun rule, Global and Planetary Change, 43, pp. 157-171.
- FitzGerald, D. M., M. S. Fenster, B. A. Argow and I. V. Buynevich (2008): Coastal impacts due to sea-level rise, Annual Review of Earth and Planetary Sciences, Vol. 36, pp. 601-647.
- Ranasinghe, R. and M. J. F. Stive (2009): Rising seas and retreating coastlines, Climatic Change, Vol. 97, pp. 465-468.