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

Long Term Shoreline Change and Future Forecast Due to Climate Change in Five Japanese Beaches

吉田 惇¹・有働恵子²・真野 明³

Jun YOSHIDA, Keiko UDO and Akira MANO

This study investigates long term shoreline changes of Japanese five beaches and estimates effect of sea level rise due to future climate change on beaches. The long term shoreline changes were investigated at Sendai, Niigata, Kashiwazaki, Kochi, and Miyazaki using old maps. In all those areas, notable erosion occurred from 1950 to 1990 and shoreline change tended to be stable after 1990. The future forecasts estimated shoreline changes using Bruun rule for SRES A1B scenario considered about wave heights and subsidence, in addition to sea level rise. The results were shoreline retreat over 10 m in five beaches. Shoreline retreat over 10 m will cause harmful impacts on the coastal management in the future.

1. はじめに

地球温暖化による熱膨張や氷河融解を主たる原因とする海面上昇が懸念されている。北太平洋海洋モデル(NPOGCM)によって算出された、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)に対する気象庁の将来予測によれば、日本近海の100年後の平均海面水位は1981~2000年と比べて9~27cm上昇すると推定されている。この予測では、温暖化に伴う海水温の上昇による熱膨張と、海流の変化による水位変化から算出されており、グリーンランドや南極の氷床など陸氷の縮小による寄与を考慮すれば、さらに海面上昇量が増大する可能性がある。

台風の大型化などによる暴風時の波高の増大など、気候変動による波浪特性の変化が懸念されている。森ら(2009)によれば、日本近海においては21世紀末の平均波高は1979~2003年の平均値と比較して、減少するが、波高の極大化が顕著になることを示している。

気候変動により海面が上昇し、暴風時の波高が増大すれば砂浜侵食リスクが増大し、長期的に汀線が後退することが予想される。沿岸域に人口が集中する我が国では、汀線後退によって人口や資産など社会経済的な影響が懸念されており、将来の気候変動による汀線変化量を予測することは喫緊の課題である。三村ら(1994)は日本全国で県別に将来の海岸侵食予測を行っており、また、須川ら(2011)は最新の海面上昇予測結果を用いて日本全

国の侵食予測を行っているものの、その社会に及ぼす影響についての検討は行っていない。本研究では、国土地理院発行の地図を用いて、砂浜諸元の異なる5海岸について、過去の長期汀線変化特性を調べるとともに、気候変動による将来の汀線変化量を予測し、予測された汀線変化量が社会に及ぼす影響を、過去の長期汀線変化特性に照らして検討することを目的とする。

2. 日本の5海岸における過去の長期汀線変化特性

調査対象海岸としては、平面地形データが入手可能で、砂浜粒径、勾配、波浪条件、地盤変動量等が異なる仙台、新潟、柏崎、高知、宮崎を選定した。図-1に日本における位置を、表-1にその砂浜諸元を示す。図-2に調査対象海岸の1900~2008年の砂浜領域の変化を示す。岸田・清水(2000)により抽出された1900年、1950年、1990

図-1 調査対象海岸

1 学生会員 修(工) 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻
2 正会員 工博 東北大学准教授 災害科学国際研究所
3 フェロー 工博 東北大学教授 災害科学国際研究所

図-2 (a) 仙台 (b) 新潟 (c) 柏崎 (d) 高知 (e) 宮崎における1900～2008年間の砂浜領域の変化

表-1 調査対象海岸の砂浜諸元

	粒径 (mm)	海底 勾配	年平均 有義波高 (m)	年最大 有義波高 (m)	地盤変動 (m)
仙台	0.26	0.047	0.62	5.8	0.025
新潟	0.48	0.066	0.71	12.0	-0.37
柏崎	0.44	0.064	0.71	12.0	0.018
高知	0.90	0.11	0.45	10.0	0.024
宮崎	1.00	0.11	0.86	8.0	-0.053

年頃の対象海岸の砂浜領域と海岸線延長のデータに、新たに抽出した2008年頃のデータを加えて、砂浜面積を海岸線延長で割ることで砂浜幅を求め、砂浜幅に砂浜の平均的な陸側境界位置の変化を考慮することで、過去の長期汀線変化特性を調べた。図-3に調査対象海岸の過去の汀線変化を示す。

1900～1950年頃は、宮崎で堆積、新潟・柏崎・高知で

図-3 5海岸の過去の長期汀線変化

侵食、仙台で安定傾向が認められた。

1950～1990年頃は、いずれの地域も侵食傾向を示しており、15～200m程度汀線が後退した。仙台海岸は、この期間に開発された関上漁港の防波堤や導流堤により、

北向きの沿岸漂砂が阻止され、名取川の南側の砂浜幅が北側よりも大きい(宇多ら, 1990)。新潟海岸は、侵食の多い信濃川河口付近では、護岸・消波ブロックなどの侵食対策が施されたことで砂浜は消失した(篠田ら, 1992)。柏崎海岸は、鯖石川～柏崎港間、柏崎刈羽原子力発電所が建設された場所で砂浜が消滅した(宇多ら, 1993)。高知海岸は、台風の常襲地域であり、その対策として汀線に沿って多くの離岸堤が設置された(山口ら, 1990)。宮崎海岸は、宮崎港と宮崎空港滑走路が建設された場所で砂浜が消失した。これらにより北向きの沿岸漂砂が遮られているため、特に宮崎港より北側で砂浜幅が減少している(宇多ら, 1992)。

1990～2008年頃は、汀線変化量が±10m以内であり、いずれの地域も1950～1990年頃に比べて、汀線変化量が小さくなった。

1950年以前は海岸法制定以前であり、海岸整備がほとんど行われておらず、汀線変化は主に自然作用により生じたと考えられる。1950～1990年頃の強い侵食傾向は、戦後の急速な沿岸開発や、1956年の海岸法制定による海岸整備で砂浜が大きく減少したことから、主に人為的な作用により生じたと考えられる。1990年以降は、海岸法により防災設備が整ったことや、1999年に海岸法が改正され、砂浜の「利用」、「環境」に配慮することが法目的に追加されたことが影響したため、1950～1990年頃に比べて汀線変化量は減少したものと考えられる。これらの結果から、現在の汀線は比較的安定する傾向にあり、将来にわたってもこの傾向が続き、気候変動による海面上昇の影響が顕在化する可能性が高い。

3. 気候変動による将来の汀線変化予測

(1) 砂浜侵食モデル

砂浜侵食量は、三村ら(1994)および須川ら(2011)と同様にBruun則を用いて推定した。Bruun則では、砂浜は閉鎖的な物質移動システムとして作動し、砂浜と沖方向からなる2次元断面は平衡な状態を保っていると仮定し、その平衡断面地形は式(1)で表される。

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

h_s は水深(m)、 A は海浜断面係数、 y は沖方向の距離(m)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いる。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(m)、 h_s は土砂移動限界水深(m)、 W_s は土砂移動限界水深までの水平距離(m)、 S は海面上昇量(m)、 B_h はバームの高さ(m)を表す。 h_s はHallemeier(1978)の式を用いて算定する。

$$h_s = 2.28H_m - 68.5(H_m^3/gT_m^3) \quad \dots\dots\dots (3)$$

H_m は最大有義波高(m)、 T_m は最大有義波周期(s)、 g は重力加速度(m/s²)を表す。 W_s は式(1)の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)の式を用いて算出する。

$$B_h = 0.125H_b^{5/8}(gT_s^2)^{3/8} \quad \dots\dots\dots (4)$$

H_b は H_s に対する碎波波高(m)、 H_s は平均有義波波高(m)、 T_s は平均有義波周期(s)を表す。 H_b は砂村(1983)の式により算定する。 $\tan \alpha$ は海底勾配、 L_s は平均有義波長を表す。

$$H_b/H_s = (\tan \alpha)^{0.2}(H_s/L_s)^{-0.25} \quad \dots\dots\dots (5)$$

以上により海面上昇量、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) 入力データ

汀線変化量は、4つの条件、すなわち、気象庁の日本近海の平均海面上昇量にグリーンランドなどの陸氷融解による海面上昇量寄与量(1.2mm/year; IPCC, 2007)を加えた値を海面上昇量とした場合(①)、①の海面上昇量に地盤変動を加えた場合(②)、②に気候変動による波高の長期変化を考慮した場合(③)、IPCCの全球平均海面上昇量の最小値・最大値を海面上昇量とした場合(④)の各場合について予測した。

日本近海の平均海面上昇量は、北太平洋海洋モデル(NPOGCM)によって算出されたA1Bシナリオに基づき、気象庁によって計算された21世紀末(2081～2100年)までの平均海面上昇量とした。ここで、平均海面上昇量とは、1981年から2000年までの平均海面に対して、1981年から2100年の将来予測をもとに、一次回帰分析によって求めた、海域別海面水位の100年あたりの変化量である。IPCCの全球平均海面上昇量は、全てのシナリオにおける全球平均海面上昇量の最小値である18cmと最大値である59cmを使用した。

図-4に②の長期変化傾向と、観測された年平均潮位を比較したものを示す。調査対象海岸の潮位データは、気象庁の潮位観測データを用いた。沿岸域は地震による地盤変動や地下水汲み上げによる地盤沈下の影響をうけやすいため、須川ら(2011)と同様に、野口ら(2010)を

参考に地殻変動量を除外して潮位を求めた。

式(1)～(5)で必要とされる波浪条件は、ナウファスの観測データを用いて、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て与えた。波高の長期変化を考慮した場合は、過去10数年の変化傾向が100年後まで続くと仮定して、ナウファスの観測データに100年後の条件(年平均有義波高: $-0.297\text{m}/100\text{years}$, 年最大有義波高: $0.958\text{m}/100\text{years}$)を加えた。

海底勾配は、2009年国土地理院発行の5mメッシュの数値地図から得られる汀線付近の砂浜勾配で与えた。砂浜の粒径は、数値地図から得られる砂浜勾配から、中央粒径と前浜勾配との関係(Beach Erosion Board, 1961)を用いて与えた。

地盤変動は、気象庁の検潮所取付水準成果表に記されている、取付水準点の標高の変動から求めた。地震によって取付水準点の位置が大幅に変動した場合を除外した過去10数年の傾向が、100年後まで続くと仮定して100年後の条件を与え、この値を相対的な海面上昇とみなして海面上昇量に加えた。

(3) 予測結果

図-5に汀線変化量の予測結果を示す。いずれの海岸においても、汀線は10m以上後退する結果となった。①について、汀線後退量が最大の仙台では、平均有義波高、最大有義波高ともに、他の調査対象海岸と比して小さいが、海底勾配が緩やかで、砂浜の粒径が最も小さいこと、海面上昇量が日本近海で最も大きいことから汀線後退が著しい結果になった。最小の宮崎では、平均海面上昇量は新潟・柏崎よりも大きく、平均有義波高と最大有義波高は、他の対象海岸と大きな差はないが、勾配が急で、砂浜の粒径が最大であることから、侵食予測では最も値が小さかった。高知は、粒径や勾配は宮崎とほぼ等しいが、最大有義波高が宮崎よりも大きいことから、宮崎よりも汀線後退量が大きくなった。

①と、④の最大値の場合の予測結果を比較すると、④の最大値では10～20m程度大きくなった。これは、他のモデルによって算出された海面上昇量よりも小さいため、推定結果以上に汀線が後退する可能性がある。

②では、地盤沈下が他海岸に比べて大きい新潟において、さらに20m以上の汀線後退が予測された。地盤沈下の影響は各地域によって異なり、新潟のように地盤沈下の影響が海面上昇よりも大きい地域があることに留意する必要がある。

いずれの地域も、気候変動による波高の長期変化を考慮した場合に汀線後退量は大きくなったが、波高変化の影響は、最大でも3m程度で限定的であった。①と③の結果から、今後予想される波高の増大よりも海面上昇の

図-4 (a)仙台 (b)新潟 (c)柏崎 (d)高知 (e)宮崎における潮位の経年変化と将来予測(A1Bシナリオ)

ほうが、汀線変化に大きな影響を及ぼすと考えられる。森ら (2009) によれば、日本近海の21世紀末の平均波高は、1979～2003年の平均値と比較して減少するが、波高の極端化が顕著になることが示されており、想定以上の波高の変化が起こった場合、本研究の予測結果以上に汀線が後退する可能性がある。

4. 結論

本研究では、過去の長期汀線変化特性を調べるとともに、最新の海岸地形データと海面上昇量の予測結果、波高の長期変化、地盤変動を考慮して、将来の汀線変化予測を行った。

過去の長期汀線変化特性を明らかにし、社会的背景からその特性について考察した結果、汀線は将来にわたって比較的安定傾向となり、将来は気候変動に伴う砂浜侵食が、顕在化する可能性が高いことを示した。

「防災」・「利用」・「環境」に配慮した海浜管理を行っていく上で、将来10m以上も汀線が後退することは社会や生態系に大きな影響を及ぼすと考えられ、今後の気候変動の影響についても考慮する必要がある。

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

- 宇多高明・小俣 篤・峯松麻成 (1900)：仙台湾沿岸における砂浜消失の危機，海岸工学論文集，第37巻，pp. 479-483。
 宇多高明・野口賢二・大澤 正 (1993)：柏崎港の防波堤建設に伴う周辺海岸の海浜変形，海岸工学論文集，第40巻，pp. 436-440。
 岸田弘之・清水雅行 (2000)：海岸情報調査による海岸侵食・堆積の抽出，海岸工学論文集，第47巻，pp. 681-685，2000。
 気象庁 (2009)：潮位観測データ，1961年～1996年。
 港湾空港技術研究所 海洋・水工部 海象情報研究チーム：全国港湾海洋波浪情報網 (ナウファス) 波浪データ，<http://www.pari.go.jp/bsh/ky-skb/ks-jyo/kaisy/dat/sub300.htm>
 国土地理院昇降検知センター 験潮場取水水準測量成果集：<http://cais.gsi.go.jp/cmdc/center/itiran.html>
 篠田 孝・宇多高明・岡村幸弘 (1992)：新潟海岸沖における大規模地形変化，海岸工学論文集，第39巻，pp. 346-350。

図-5 将来の汀線変化予測

- 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。
 須川太一・有働恵子・三村信男・真野 明 (2011)：海面上昇に伴う全国砂浜侵食量の推定，土木学会論文集B2 (海岸工学)，Vol. 67, No. 2, pp. 1196-1200。
 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。
 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，Vol.B2-65，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・泉官尊司・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・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.B2-65，No.1，pp. 1271-1275。
 山口 修・宇多高明・原 俊哉・田中金春・土井寛幸 (1990)：台風8911，8912号による高知海岸の海岸決壊，海岸工学論文集，第37巻，pp. 280-285。
 Bruun, P. 1962 (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*, 4, pp. 253-277。
 Intergovernmental Panel on Climate (IPCC) (2007)：Climate Change 2007。