等深線変化モデルによる気候変動に伴う 長期海浜変形予測と影響評価

澁谷 容子¹・黒岩 正光²・林 健太郎³・池田 健太⁴
森 信人⁵・松原 雄平⁶・間瀬 肇⁷

¹正会員 京都大学防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)
E-mail:shibutani.youko.4c@kyoto-u.ac.jp

²正会員 鳥取大学大学院 工学研究科 (〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南4-101)
E-mail:kuroiwa@tottori-u.ac.jp

³正会員 三井海洋開発株式会社 (〒103-0027 東京都中央区日本橋二丁目3番10号)
E-mail:Kentaro.Hayashi@modec.com

⁴五洋建設株式会社 (〒112-8576 東京都文京区後楽2-2-8)

⁵正会員 京都大学防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)
E-mail:mori@oceanwave.jp

⁶正会員 鳥取大学大学院 工学研究科 (〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南4-101)
E-mail:matubara@tottori-u.ac.jp

⁷正会員 京都大学防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)
E-mail:mase.hajime.5c@kyoto-u.ac.jp

地球温暖化に伴い、海面上昇に加えて、波浪等の沿岸外力の変化が予測されており、これらによる海浜変形及び社会経済への影響評価について気候変動の不確実性を考慮することが重要である。波浪諸元の長期的な変化は、海浜変形に大きなインパクトを与えることが予想され、本研究では砂浜に着目し、どのような影響が起り得るのか検討する。

通常、海浜変形予測過程に波浪の将来変化および海面上昇を考慮することで、将来気候に対する海浜変形への影響評価を行う。将来気候における外力の変化は、大気循環モデル (General Circulation Model : GCM) による将来気候計算結果の海上風を外力に用いて計算された波浪予測結果を用いる。海浜変形は、鳥取県皆生海岸を対象に、将来気候条件下における海浜変形の将来変化を推定し、外力変化に対する影響を検討する。

Key Words : climatechange, shoreline change, N-line model, wave direction

1. はじめに

将来気候において海面上昇および沿岸外力が変化することが予測されており、これらに伴う影響評価を行うことが急務とされている。気象モデルによる将来予測実験結果に基づく海岸への影響評価は様々行われており、森ら¹⁾やHemerら²⁾は全球における波浪場の将来変化を予測し、将来気候において日本沿岸海域においては平均波高が小さくなること(図-1)、極大波浪が増加することなどを明らかにしている。

一方で、島国であるわが国にとって海岸侵食問題はこれまでも喫緊の課題である。既往の調査結果をもとにし

た過去再現評価による波浪や海浜変形の将来予測だけでなく、気候変動に伴う諸条件の長期変化を考慮することが必要になってきている。これまで、海面上昇に伴う汀

図-1 12-5月の平均 H_s の将来変化: 12モデルアンサンブル (2100-2000年の差)

線の後退量の評価にはBruun則³⁾が用いられてきたが、静的な岸沖方向の変化のみが仮定され、沿岸漂砂を考慮しない簡便な予測には課題が多いため、最近では林ら⁴⁾により構造物が整備されている外洋に面した海岸を対象として、沿岸外力の変化に応じた沿岸漂砂の変化を考慮した気候変動に伴う汀線変化予測が行われている。このように、気候変動が海浜変形へ及ぼす影響を評価するためには、Bruun則による汀線後退量の評価だけでなく、過去再現評価と同様に、海浜変形過程に、各々の海岸に対する外力変化の影響を考慮する必要がある。本研究では、湾奥に位置する海岸（鳥取県皆生海岸）を対象とした将来気候における海浜変形への影響を検討するため、外洋と湾奥での波浪特性の変化および海面上昇の影響を考慮した等深線変化モデルを構築し、気候変動に伴う海浜変形の変化を推定し、その影響について考察する。

2. 皆生海岸における波浪特性

鳥取県西部に位置する皆生海岸は、島根半島に囲まれた美保湾に面する約20kmの砂浜海岸であり、海岸侵食が深刻化していることから、構造物設置やサンドパイパス・サンドリサイクルなどによる様々な侵食対策が施されている。本研究ではサンドリサイクルが実施されている、図-2に示す境港マリーナから富益工区の5km(黄枠)を対象に波浪特性を把握し、海浜変形計算を実施する。

図-2 対象海岸と計算領域の関係

国土交通省中国地方整備局日野川河川事務所により実施されている、富益波浪観測結果と（北緯35° 30' 00"，東経133° 18' 26"），NOWPHAS鳥取（北緯35° 33' 00"，東経134° 10' 00"：鳥取港沖）の波浪観測結果の比較検討を行う。波浪解析期間は富益および鳥取の波浪データの取得率がともに80%以上である2010年から2012年とする。図-3に鳥取沖合(上図)と富益(下図)の波高および波向の頻度分布を示す。鳥取沖合ではNW, NNW, Nからの波浪が卓越し、比較的波高が大きい、NNE, NEから来襲する波浪も30%程度存在することがわかる。富益にお

ける波向はほぼNE, ENEであり、沖波の入射波向きによらず東からの波浪が卓越している。そこで、鳥取沖合の波浪の波向（NW, NNW, N, NNE, NE）に対する富益の波浪エネルギー(H^2T)を図-4に示す。図中の方位は鳥取沖合の波向きを意味し、それらが観測された時刻の富益の波浪について整理したものである。図-4より、沖合で西側から入射した波浪のエネルギーはほぼ減衰しているが、東から入射した波浪は減衰することなく沿岸部に伝播していることがわかる。したがって、皆生海岸の土砂移動に寄与する波浪は、主に東から来襲するものと考えられる。そこで、美保湾を含む領域（図-2：A領域）においてエネルギー平衡方程式により波浪の浅水変形計算を行い、沖波の入射角に対する沿岸部での波浪特性の検討を行う。

図-3 観測された波向別有義波高の頻度分布

図-4 鳥取沖の波向別に対する富益の波浪エネルギー

図-5は、NNWおよびNEを代表波浪に対象海岸の波浪場の浅水変形計算を行った波向きおよび波高分布の結果である。波向きは、A領域の岸沖方向を0°とし、反時計まわりに+で定義される。NNWから入射した波浪は島根半島の影響により回折し、波高はほぼ減衰しているのに対して、NEから入射した波浪は減衰することなく沿岸部へ到達していることが確認できるが、観測値の波向の傾きまでは再現できていない。また、沖で西側からの波浪が観測された時刻における富益の波浪エネルギーも減衰傾向であった。日本海側では季節波浪の変化に対する議論がしばしば行われるが、皆生海岸のように湾内の特徴を有する海岸は季節波浪だけでなく、入射波向きが地形変化に大きく関わっていることが再確認された。したがって、対象海岸において海浜変形に寄与する主な波浪はN, NNE, NEから来襲するものと推測されることから、これらの方向の波浪を用いて海浜変形計算を実施する。

図-5 NNW NEに対する波向きおよび波高分布

3. 等深線変化モデルの構築と再現計算

海浜変形計算には、澁谷ら⁹⁾の季節波浪および移流拡散による土砂投入を考慮した等深線変化モデルを用いるが、波浪場の計算において波高分布と波向分布を、また海面上昇による水位上昇またはBrunn則による後退量を入力値として考慮できるよう改良した。計算フローを図-6に、Brunn則を以下に示す。

$$h = A_s y^{2.3} \quad (1)$$

ここに、 h は水深、 y は沖方向の距離、 A_s は海浜断面係数である。 A_s は各海岸の固有定数であることから、 A_s の決定には皆生海岸の測量断面と比較し、式(1)の移動限界水深が現地のそれ(8m)となるように決定した。

サンドリサイクルが行われる以前の1987-1993年までの

6年間を対象に変化量の再現計算を実施した後、サンドリサイクル実施期間である1994年以降の年平均変動量の再現を行う。波浪場は、美保湾全体を含む図-2のA領域（沿岸方向： $x=2000\text{m}$ 岸沖方向： $y=1500\text{m}$ ）においてエネルギー平衡方程式により算出された波高および波向分布を計算領域へ内挿することにより設定する。解析条件を表-1に示す。波向きは計算領域に対して岸沖方向に0°をとり、反時計回りに+で定義される。皆生海岸の海浜変形に有効な外力はNNEおよびNEからの波浪であることから、NNEとNEの間で、本海岸における主となる地形変化をもたらすと推定される波向条件を用い、エネルギー平衡方程式により沿岸の波浪分布を算出する。波向については、観測値との乖離が課題である。そこで、本研究では、観測値に合わせて一律に補正(-20°)を行い、波高はそのまま用いることで沿岸外力を推定する。また、本海岸ではサンドリサイクルが侵食対策として実施されており、土砂投入の考慮は実績⁹⁾を参考に年間30,000m³を120日かけて東端の汀線付近に養浜する。まず、過去の変化量を再現してキャリブレーションを行う。図-7にサンドリサイクル開始前および開始後の汀線変化量の差（計算値および実測値）を示す。いずれも計算期間は6年間である。サンドリサイクル開始後の実際の汀線変化量は、東端で年平均1.5m～2.0m後退、西側で2.0m程度前進している⁹⁾ことから、それらの年平均を6倍したものを実測値としてプロットしてある(図-7(b))。なお、実測値については、鳥取県西部海岸管理協議会資料⁹⁾より読み取ったものである。東側での侵食量および西側での堆積量は概ね一致しており、また養浜の効果により東側の侵食が緩和されていることが確認できる。このキャリブレーション結果を基に気候変動を考慮した海浜変形計算を行う。

図-6 等深線変化モデルの数値計算フロー

表-1 過去再現計算に用いた解析条件

解析条件	
沖波条件	$H_s=0.98\text{m}$ $T_s=5.70\text{s}$ $\alpha=-18.0^\circ$
D_{50}	0.2mm
計算格子(領域A)	2000×1500 格子間隔: 10m
計算格子	250×86 格子間隔: 20m
境界	両端で漂砂量0
養浜	30,000m ³ /年 汀線付近に投入

(a) 1987-1993年の汀線変化量(養浜無)

(b) 1994-1996年の汀線変化量(養浜有)

図-7 再現期間における汀線変化量

4. 気候変動が海浜変形へ及ぼす影響

(1) 波浪変化による影響

波浪は、志村ら⁷⁾による、水平解像度60kmの全球大気モデル(MRI-AGCM-3.2H)の海上風を外力としてWAVE WATCH III VER.3.14により計算された、現在気候及び将来気候における解析結果を用いる。表-2, 3に将来気候と、現在気候における近傍メッシュの季節毎の平均波高および平均周期の変化量を示す。C0からC3は月平均SST(海面水温)の違いを表したものである。平均波高および平均周期の将来変化量は小さく、優位な差は見られないが、平均波向きは、図-8に示すように差が見られた。現在気候と比較した将来気候における平均波向きの変化は、 -5° から $+3^\circ$ の変化が確認できる。したがって、気候変動の不確実性を考慮して波向を $\pm 5^\circ$ および $\pm 3^\circ$ 観測値から変化させることで、気候変動による海浜変形への影響の検討を行う。将来気候における海浜変形計算は過去再現計算と同様の条件(表-1)で行うが、長期的な影響の検討を行うため、計算期間は20年とし、波向きを $\pm 3^\circ$ および $\pm 5^\circ$ 変化させ、気候変動条件下の波浪条件とする。汀線および水深6mの20年間の変化量を図-9(a), (b)に現在および将来の波浪条件下における汀線変化量の差を図-9(c)に示す。

表-2 将来気候と現在気候における平均波高の変化量(cm)

	12-3月	3-5月	6-8月	9-11月	平均
C0	-10.3	-4.7	1.0	-8.0	-5.1
C1	-11.3	-7.4	3.1	-4.6	-4.7
C2	-16.7	-10.9	3.1	-9.4	-8.6
C3	-15.5	-5.4	8.9	-5.5	-5.1

表-3 将来気候と現在気候における平均周期の変化量(s)

	12-3月	3-5月	6-8月	9-11月	平均
C0	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	-0.1
C1	-0.1	-0.2	0.1	-0.1	-0.1
C2	-0.2	-0.2	0.1	-0.1	-0.1
C3	-0.2	-0.1	0.2	-0.1	-0.1

図-8 将来気候と現在気候における平均波向の変化量(°)

すべてのケースで現在の波浪条件と同様な汀線変化の分布形状が見られるが、その変化量は異なることがわかる。波向きがより東側に傾いた場合(-3° , -5°)現在の波浪条件による地形変化よりも、さらに侵食堆積が顕著化するが、反対に西側に変化すると、侵食および堆積は緩和される傾向にある。本研究における将来波浪の条件下では、将来変化に対する汀線変化量は20年間で構造物周辺での局所的に最大70m程度の振れ幅があり、現在の波向きからどちらの方向に数度変化するかにより、今後の地形変化が大きく異なることが推定された。また、波高および周期の変化(波高が20cm小さくなった場合、周期が0.3秒短くなった場合)の検討も行ったが、いずれも現在の波浪条件下より侵食堆積が緩和される傾向であった(図-10)。

皆生海岸では、年間30,000m³のサンドリサイクルが行われていることから、現状の対策において将来気候において波向きが変化した場合の影響についての検討を行う。将来気候における波向きの変化は、 $\pm 3^\circ$, $\pm 5^\circ$ のうち最も皆生海岸にとって大きな影響を及ぼすと推定される条件として、 -5° 変化した場合について結果を考察する。図-11に波浪を -5° 変化させ、現状の土砂投入(表-1参照)を行った場合の20年間の変化量の差を示す。波向きが -5° 変化すると、東側の侵食および西側の堆積がさらに深刻化するが、養浜により侵食は緩和される。しかし、堆積量は依然として多く、将来の波浪条件下では現在のそれよりも20~30m程度前進している。よって、気候変動に伴い東側に波向きが変化した場合、現状よりも多くの土砂浚渫が必要な可能性がある。

(a) 訂線変化量

(b) 水深 6m における変化量

(c) 訂線の現在条件と将来条件の変化量の差

図-9 波向変化による 20 年間の変化量 (養浜なし)

図-10 波高および周期の変化による 20 年間の変化量

(a) 訂線変化量

(b) 水深 6m における変化量

(c) 訂線の現在条件と将来条件の変化量の差

図-11 20 年間の変化量 (養浜あり)

現状の対策がある程度有効であること、また、より多くの土砂浚渫が必要であることが示された。一方、西側に波向きが変化した場合、侵食および堆積は緩和される傾向にあるものの、当該海岸における海岸侵食対策は現状の傾向に対するものであることから、現状の対策とはまったく異なった侵食対策が必要となる可能性がある。

(2) 海面上昇による影響

海面上昇がおこった場合の海浜変形への影響の検討を行う。海面上昇による後退量は①Bruun則により等深線ごとに後退量を算出し、海浜変形計算に付加する方法と、②水位を一律に上昇 (すべての等深線において一律に後退) させる方法により算出する。海面上昇量は森ら¹⁾の A1B シナリオ下における 2100 年の日本沿岸の平均上昇量 0.25m を適用する。Bruun 則により後退量を算出した場合と 0.25m 上昇した場合の海面上昇の影響を図-12 に示す。凡例は等深線(水深)を示している。Bruun 則により後退量を算出し、等深線変化に付加した場合、等深線ごとおよび沿岸方向の変化量に違いがみられ、より緩勾配である水深の深い領域においてより後退し、訂線近傍での後退量は少ない状況が計算できている。図-12(c)は沿岸方向 3000m 地点の水深と離岸距離の関係を示したもので、この図からも水深の浅い領域 (海底勾配が急) における違いが確認できる。一律の水位上昇では地形変化への影響

(a) Bruun 則による等深線後退量

(b) 海面上昇量 0.25m に対する等深線後退量

(c) 沿岸方向 3000m 地点の海浜断面

図-12 海面上昇による 20 年間の変化量

は上昇量に対する変化量のみである(図12-(b))が、Bruun則により後退量を算出し海浜変形計算に組み込むことで、断面形状の違いによる地形変化の影響を考慮可能であるが、海面上昇に伴う変化はいずれも、海底勾配と水位上昇との関係に依存する。

6. おわりに

本研究では、気候変動の影響を考慮可能な等深線変化モデルを構築するとともに、鳥取県西部に位置する皆生海岸を対象に気候変動が海浜変形へ及ぼす影響について検討を行った。得られた結論を以下にまとめる。

- ・鳥取沖合ではNW, NNW, Nからの波浪が卓越し、波高も大きい。皆生海岸は湾奥に位置する特性から、西側から入射した波浪は島根半島の影響により回折しほぼ減衰するため、その地形変化に寄与する沖波は概ね東側からの波浪であると推察される。
- ・現在気候および将来気候における日本海鳥取沖での波浪推算結果より、鳥取海岸における将来の平均波高・平均周期の変化に顕著な差は見られないが、波向は -5° から $+3^{\circ}$ の変化が予測される。
- ・将来気候において波向が変化した場合、海浜への影響が大きいと推察され、等深線変化モデルを用いて変更した結果、波向の変化が現在の波浪に対して、東西どちらの方向に変化するかで、地形変化の傾向は大きく異なる。
- ・20年間の予測期間において、構造物周辺での局所的な変化が顕著となり、最大で70m程度の汀線変化が推定される。海面が0.25m上昇した場合のBruun則による後退量は1~12mであり、波向きの変化は海面上昇による影響よりもはるかに大きい。
- ・波向が東側に变化した場合、侵食および堆積がさらに顕著化するが、現状のサンドリサイクルによりある程度防護可能である。
- ・Bruun則による海面上昇に対する後退量を等深線ごと

に考慮することで、断面形状の違いによる地形変化の影響を考慮可能である。Bruun則のみによる岸沖方向への静的解析結果と比較すると水深の浅い領域での変化に大きな違いが生じる。

謝辞：本研究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」および科学研究費補助金の成果である。また、国土交通省中国地方整備局日野川河川事務所より波浪データの提供をいただいた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 森信人, 志村智也, 中條壮太, 安田誠宏, 間瀬肇: マルチモデルアンサンブルに基づく地球温暖化に伴う沿岸外力の将来変化予測, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.67, No.2 pp. I_1191- I_1195, 2011.
- 2) Hemer, M.A., Y. Fan, N. Mori, A. Semedo and X.L.Wang: Projected changes in wave climate from a multi-model ensemble, Nature Climate Change, 6p., doi:10.1038/nclimate1791, 2013.
- 3) Bruun, P. 1962: Sea-level rise as a cause of shore erosion, J. Waterways and Harbors Div., ASCE, 88(WW1), pp. 117-130, 1962.
- 4) 林健太郎, 志村智也, 森信人, 間瀬肇: 気候変動に伴う沿岸外力変化が汀線変化へ及ぼす影響評価—海面水温アンサンブル実験を用いた検討—, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol. 69, No.2 pp. I_778 I_783, 2013.
- 5) 澁谷容子・松原雄平・黒岩正光・山田隆史: 波浪変化および移流拡散による土砂投入を考慮した等深線変化モデル, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol. 28, No.2 pp. I_618 I_623, 2012.
- 6) 鳥取県: 平成 24 年度 鳥取県西部海岸管理協議会説明資料, 2014.
- 7) 志村智也, 森信人, 安田誠宏, 間瀬肇: 海面水温アンサンブル実験に基づく波浪の将来変化傾向とその不確実性評価, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 69, No.2 pp. I_1266- I_1270, 2013.

Long-term Beach Prediction and Impact Assessment of Climate Change on Contour Line Changes

Yoko SHIBUTANI, Masamitsu KUROIWA, Kentaro HAYASHI, Kenta IKEDA,
Nobuhito MORI, Yuhei MATSUBARA and Hajime MASE

The Assessment Report No. 5 of IPCC reported that sea level will rise and wave characteristics will change due to the effects of global warming in future climate with very likely. In order to investigate the effects of climate change on beach changes, the numerical model of beach profile change which takes into account of the effects of changes of sea level and waves was proposed in this study, and evaluated shore-line and contour line change of sea bottom around Kaike coast in Tottori prefecture from present to future climate.